



Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner

Sammenfattende beskrivelse af 6 enfamiliehuse med fokus på byggeteknik, energiøkonomisk optimering samt beregning og målinger af opvarmningsbehov

Tommerup, Henrik M.; Rose, Jørgen

Publication date:
2003

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Tommerup, H. M., & Rose, J. (2003). *Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner: Sammenfattende beskrivelse af 6 enfamiliehuse med fokus på byggeteknik, energiøkonomisk optimering samt beregning og målinger af opvarmningsbehov*. Byg Rapport No. R-069 <http://www4.byg.dtu.dk/publications/rapporter/byg-r069.pdf>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Jørgen Rose
Henrik Tommerup

Forsøgshuse med nye typer klimaskærmskonstruktioner

Sammenfattende beskrivelse af 6 enfamiliehuse med fokus på byggeteknik, energiøkonomisk optimering samt beregninger og målinger af opvarmningsbehov.

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Rapport
BYG•DTU R-069
2003
ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-131-5

Forsøgshuse med nye typer klimaskærmskonstruktioner

Sammenfattende beskrivelse af 6 enfamiliehuse med fokus på byggeteknik, energiøkonomisk optimering samt beregninger og målinger af opvarmningsbehov.

Jørgen Rose
Henrik Tommerup



Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2003

FORORD

Projekt ”Forsøgshuse med nye typer klimaskærmskonstruktioner” under Energistyrelsens Energiforskningsprogram (j. nr. 1213/00-0011) omfatter udvikling af og målinger på enfamiliehuse med et energiforbrug til opvarmning, der lever op til de forventede skærpede energikrav til nybyggeriet i Bygningsreglement 2005. Projektet er udført som et samarbejde mellem BYG•DTU og Statens Byggeforskningsinstitut (By og Byg) samt Lind & Risør, SHS Byg, Danhaus Production A/S, Thyholm Murer og Eurodan Huse. Herudover har medvirket en lang række producenter af byggematerialer, varme- og ventilationsanlæg mv.

Husene er opført i Snekkersten, Lemvig, Hillerød og på Thyholm. Det 5. hus i rækken vil ikke blive opført da byggefirmaet ikke kunne finde en interesseret køber til huset.

Ud over de 5 huse indgår i nærværende rapport ligeledes et tilsvarende hus fra et tidligere projekt under Energistyrelsens Energiforskningsprogram; ”Optimering af klimaskærm samt varme- og ventilationsanlæg i et typehus mht. energiforbrug, indeklima og økonomi” (j. nr. 1213/99-0002). Dette hus lever ligeledes op til kommende skærpede krav til nybyggeriet, og projektet er derfor interessant at medtage i denne sammenfattende rapport. Huset er opført i Brøndby Strand af Bülow & Nielsen.

I husene er der gennemført detaljerede energi- og indeklimamålinger. For huset på Thyholm vil målingerne dog først blive gennemført fra december 2003.

Begge de omtalte projekter er igangsat før der blev tale om at overgå til bruttoenergiramme-krav, og derfor er bygningerne udviklet udelukkende med fokus på energiforbruget til opvarmning. I rapporten er der alligevel opstillet bruttoenergirammer for de betragtede bygninger, således at der skabes et overblik over betydningen af at indføre denne i det kommende Bygningsreglement.

Denne rapport er en sammenfatning af projektet og omhandler husenes klimaskærm og installationer, de gennemførte detaljerede beregninger og målinger af energiforbrug samt erfaringer fra byggeperioden og den efterfølgende tid. Der foreligger separate rapporter på de enkelte huse, der beskriver konstruktioner og systemer samt energimæssige beregninger og målinger. Disse rapporter kan findes på BYG.DTU's hjemmeside www.byg.dtu.dk under *Publications*.

Rapportens forfattere er:

Jørgen Rose, forskningsadjunkt, BYG•DTU.

Henrik Tommerup, forskningsadjunkt, BYG•DTU.

Professor Svend Svendsen, BYG•DTU, har været projektleder.

Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, november 2003.

RESUMÉ

De seks huse beskrevet i denne rapport er forsøgshuse som er projekteret i forbindelse med to forskellige EFP-projekter (Energistyrelsens Energiforskningsprogram). De fem af husene er fremkommet i forbindelse med projektet "Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner" (ENS J. nr. 1213/00-0011); et projekt under energiforskningsprogram 2000 (EFP2000). Det sidste hus er fremkommet under projektet "Optimering af klimaskærm samt varme- og ventilationsanlæg i et typehus mht. energiforbrug, indeklimate og økonomi" (ENS J. nr. 1213/99-0002); et projekt under energiforskningsprogram 1999 (EFP1999).

Projektets ene formål var at demonstrere, at det er muligt at bygge typiske enfamiliehuse med et energiforbrug der opfylder forventede skærpede krav i bygningsreglementet, og at det kan ske byggeteknisk forsvarligt og indenfor fornuftige økonomiske rammer. Det var således også formålet at medvirke til at styrke udviklingen af bedre klimaskærmskonstruktioner. Projektets andet formål var at foretage detaljerede målinger af indeklimate og energiforbrug, således at den varmetekniske ydeevne for fremtidens klimaskærmskonstruktioner underbygges.

Fire af forsøgshusene er opført, ét femte hus vil være færdigt i december 2003 og det sjette hus i rækken vil ikke blive opført. For tre af de allerede opførte huse er der gennemført detaljerede målinger af indeklimate og energiforbrug.

To af de seks huse blev inddraget i projektet på et meget sent tidspunkt i forløbet, og derfor har projektet i disse tilfælde ikke haft indflydelse på valg af konstruktioner og samlingsdetaljer udformning samt varme- og ventilationsanlæg. Disse huse er alligevel medtaget i projektet idet de indeholder meget interessante løsninger, og samtidig kan leve op til projektets mål om en reduktion af opvarmningsbehovet på mindst 33 % i forhold til den nu gældende energiramme.

Rapporten indledes med en kortfattet gennemgang af projektets baggrund og formål.

I kapitel 2 beskrives kortfattet baggrunden for valg af byggetekniske løsninger og installationer for de huse hvor projektet har deltaget aktivt i denne fase. Endvidere gives en kortfattet gennemgang af de enkelte huses grundlæggende opbygning, beliggenhed mv.

I rapportens kapitel 3 gennemgås de byggetekniske løsninger for hvert af de seks forsøgshuse. I kapitlet gives detaljerede tegninger af beliggenhedsplan, grundplan, facader, tværsnit samt beskrivelser og tegninger af konstruktionsopbygninger og samlingsdetaljer. Ydermere gives der en detaljeret beskrivelse af vinduer og døre.

Kapitel 4 beskriver forsøgshusenes installationer, dvs. varme- og ventilationsanlæg mv.

Rapportens kapitel 5 omhandler de beregninger der som udgangspunkt er lavet for forsøgshusene. I kapitlet er opstillet sammenfattende tabeller for varmetabskoefficienter, dimensionerende varmetab, opvarmningsbehov, bruttoenergiramme og indeklimate. Kapitlet svarer til en sammenfatning af de resultater som er beskrevet i tidligere rapporter fra projektet.

I kapitel 6 gennemgås de detaljerede målinger af forsøgshusenes energiforbrug og indeklimate. Måleresultaterne sammenlignes med tilsvarende beregninger, og der foretages en korrigeret

beregning af husenes forventede årlige opvarmningsbehov. Kapitlet beskriver endvidere de luftskiftemålinger der er foretaget for forsøgshusene.

Rapportens kapitel 7 omhandler de økonomiske aspekter. Der foretages således en økonomisk vurdering af de energibesparende tiltag, som er benyttet i de forskellige huse, og den samlede ekstra omkostning sammenholdes med den energibesparelse der er opnået.

Slutteligt sammenfattes rapporten med de erfaringer som er gjort i forbindelse med projektet.

SUMMARY

The six houses described in this report are experimental buildings that has been developed under two different EFP-projects (Energy Research Program). Five of the houses have been developed under the project “Experimental buildings with new types of building envelope structures” (Forsøgsbygninger med nye typer klimaskærmskonstruktioner, ENS J. nr. 1213/00-0011); a project under Energy Research Program 2000 (EFP2000). The last house was developed under the project “Optimization of the building envelope as well as heating and ventilation system in a one family house with respect to energy consumption, indoor climate and economy” (Optimering af klimaskærm samt varme- og ventilationsanlæg I et typehus mht. energiforbrug, indeklimate og økonomi, ENS J. nr. 1213/99-0002); a project under Energy Research Program 1999 (EFP1999).

The first purpose of the project was to demonstrate that it is possible to build typical single family houses with an energy consumption that meets the expected future Building Regulations, and that this could be achieved without problems concerning building technology or economy. Therefore it was also the purpose to strengthen the development of better envelope constructions. The second purpose of the project was to perform detailed measurements of indoor climate and energy consumption so that the thermal aspects of the future envelope constructions were substantiated.

Four of the experimental buildings have already been built, a fifth house will be finished in December 2003 and the sixth house will not be built. For three of the houses that have already been built, detailed measurements of indoor climate and energy consumption have been carried out.

Two of the six houses were included in the project at a very late stage, and therefore the project didn't have any influence on the chosen solutions. These houses are still part of the project as they represent some very interesting solutions, and furthermore are able to meet the purpose of the project, e.g. to have an expected energy consumption that is reduced with at least 33 % compared to the present Building Regulations.

The report starts of with a short introduction to the background and purpose of the project.

In chapter 2 the reasons for choosing the different types of envelope constructions and installations are described for the houses which entered the project from the beginning. Furthermore, a short description of the different houses fundamentals are given, e.g. type of house, placement etc.

In chapter 3 detailed descriptions of the different houses are given., including floorplans, facades, cross sections of building envelope constructions and building joints. Furthermore, detailed descriptions of windows and doors are given in this chapter.

In chapter 4 the experimental houses' installations are described, e.g. heat and ventilation systems.

Chapter 5 describes the detailed calculations that have been carried out for the experimental buildings. Summarized tables for heat loss coefficients, dimensioning heat loss, expected energy consumption, gross energy consumption and indoor climate are presented. The chapter represents a summation of the results presented in earlier reports from the project.

In chapter 6 the detailed measurements of indoor climate and energy consumption for the experimental buildings are presented. The measurements are compared to the calculations described in chapter 5, and a corrected calculation of the expected annual heat consumption for the houses are carried out. The chapter also described the detailed measurements of air change rates that were performed.

Chapter 7 of the report deals with the economic aspects of the experimental buildings. An economical evaluation of the different energy saving measures used in the different houses are made, and the total extra cost is compared to the total energy savings that have been achieved.

Finally, the report is concluded with a summation of the experiences that have been achieved through the project.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
RESUMÉ	3
SUMMARY	5
INDHOLDSFORTEGNELSE	7
1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Formål	10
1.3 Gennemførelse	10
1.4 Nye energibestemmelser og varmeisoleringskrav	10
2 FORSØGSHUSENE	13
2.1 Baggrund for valg af byggetekniske løsninger og installationer	13
2.2 Udformningen	15
2.3 Arealer mm.	15
2.4 Solafskærmning	16
2.5 Lufttæthed	16
3 BYGGETEKNISKE LØSNINGER	19
3.1 Hus A. Skalmurede porebetonelementer	19
3.2 Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet	29
3.3 Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet	39
3.4 Hus D. Fuldmuret	43
3.5 Hus E. Skalmurede porebetonelementer	51
3.6 Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton	59
4 INSTALLATIONER	67
4.1 Ventilation	67
4.2 Anlæg for varme og varmt brugsvand	68
5 BEREGNEDE ENERGIMÆSSIGE FORHOLD	71
5.1 Varmetransmissionskoefficienter	71
5.2 Varmetabsramme og dimensionerende varmetab	72
5.3 Energiforbrug	72
5.4 Bruttoenergiramme – Bygningsreglement 2005	74
5.5 Indeklima	77
6 MÅLINGER AF OPVARMNINGSBEHOV OG LUFTTÆTHED	81
6.1 Luftskeftemålinger	81
6.2 Energiforbrug og indeklima	85
7 ØKONOMI – NYE VS. TRADITIONELLE LØSNINGER	97
7.1 Vurderingsmetode	97
7.2 Beregningsforudsætninger	98
7.3 Hus A. Skalmurede porebetonelementer	99
7.4 Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet	101
7.5 Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet	104
8 SAMMENFATNING	109
8.1 Beregnede energimæssige forhold	109
8.2 Målinger af opvarmningsbehov og lufttæthed	110
8.3 Økonomi – Nye vs. traditionelle løsninger	111
8.4 Konklusion	111

9	REFERENCER	113
10	BILAG	115

1 PROJEKTETS BAGGRUND OG FORMÅL

1.1 Baggrund

I Energi 2000 (handlingsplan for en bæredygtig udvikling fra 1990) [1] forpligtede regeringen sig til at arbejde for, at nybyggeriets varmebehov reduceres til 50 % af det daværende niveau frem til år 2000. Bygningsreglementet, der kom i 1995, medførte en reduktion på 25 %. Før en yderligere skærpelse iværksættes, gennemføres de nødvendige udredninger og forsøgsprojekter, der belyser de økonomiske, byggetekniske samt indeklimatekniske og komfortmæssige konsekvenser. Energimålsætningen er i år 2005 at nedbringe energibehovet i nybyggeriet til et niveau, der svarer til 50 % - målsætningen i Energi 2000, dvs. med yderligere 33 % i forhold til BR-95.

For at kunne opfylde de skærpede krav var der et stort behov for udvikling af nye klimaskærmskonstruktioner med mere isolering og færre kuldebroer.

I 1996 startede 1. fase af EFP-projektet "Klimaskærm til fremtidens nybyggeri og energirenovering" (j. nr. 1213/96-0012), og projektet afsluttedes år 1998. Projektet blev gennemført af Institut for Bygninger og Energi (nu BYG•DTU), og havde til formål at analysere eksisterende klimaskærmskonstruktioners varmetekniske egenskaber, således at grundlaget for udviklingen af nye klimaskærmskonstruktioner med større isoleringstykkelser og færre kuldebroer blev fastlagt.

I 1998 startede 2. fase af "Klimaskærmsprojektet" (j. nr. 1213/98-0001), og projektet afsluttedes år 2000. Projektet, som blev gennemført ved Institut for Bygninger og Energi (nu BYG•DTU) på Danmarks Tekniske Universitet i samarbejde med By og Byg, havde til formål, med udgangspunkt i de problemstillinger som var klarlagt i projektets første fase, at udvikle nye klimaskærmskonstruktioner, som gør det muligt at opfylde forventede skærpede krav. De udviklede konstruktioners varmetekniske ydeevne blev i denne forbindelse udelukkende underbygget ved detaljerede beregninger.

For at igangsætte processen mht. at implementere de udviklede konstruktionstyper var der et stort behov for at underbygge konstruktionernes ydeevne under realistiske forhold, da byggebranchen måtte have sikkerhed for at grundlaget var i orden før ideerne kunne indføres. Der var således et behov for at vise de nye konstruktioner i en realistisk sammenhæng samtidig med at deres beregnede ydeevne underbyggedes ved realistiske in-situ målinger.

I 1999 startede projektet "Optimering af klimaskærm samt varme- og ventilationsanlæg i et typehus mht. energiforbrug, indeklimateknik og økonomi" (ENS j. nr. 1213/99-0002), som blev gennemført ved Institut for Bygninger og Energi (nu BYG•DTU). Formålet med dette projekt var, i samarbejde med et typehusfirma (Bülow & Nielsen), med udgangspunkt i typiske løsninger for eksisterende typehuse, at ændre på isoleringstykkelser samt varme- og ventilationsanlæg, således at resultatet var et nyt typehus som kunne leve op til forventede fremtidige energiramme-krav.

I 2000 startede så nærværende projekt "Forsøgshuse med nye typer klimaskærmskonstruktioner" (ENS j. nr. 1213/00-0011), som ligeledes blev gennemført ved Institut for Bygninger og Energi i samarbejde med By og Byg. Projektets formål mv. er nærmere beskrevet i de efterfølgende afsnit.

1.2 Formål

Projektets overordnede formål var at dokumentere den varmetekniske ydeevne for fremtidens klimaskærmskonstruktioner således at det blev eftervist at de forventede skærpelser til bygningsreglementet kunne udføres byggeteknisk forsvarligt og indenfor fornuftige økonomiske rammer.

Det var hensigten at projektet skulle medvirke til at styrke udviklingen af bedre klimaskærmskonstruktioner ved blandt andet at vise gode eksempler på integration af vinduer i de nye typer klimaskærmskonstruktioner samt illustrere hvordan husets energisystemer (gulvvarme- og ventilationsanlæg) kunne udnyttes bedst muligt og derved medvirke til at nedbringe husets varmebehov. Desuden var formålet at underbygge disse konstruktioners varmetekniske ydeevne ved at foretage detaljerede målinger af energiforbrug mv.

1.3 Gennemførelse

Danske typehusproducenter viste stor interesse for projektet, hvilket gjorde det muligt at opføre egentlige forsøgshuse. Gennem et snævert samarbejde, udvikling og projektering direkte med typehusproducenter og underleverandører i en realistisk sammenhæng, foregik implementeringen af de nye konstruktioner derved på en hensigtsmæssig måde. Det skal bemærkes at hensynet til god byggeskik og til husenes salgbarhed har spillet en afgørende rolle i udviklingsarbejdet.

BYG•DTU og By og Byg har ikke direkte medvirket ved udvikling, projektering og opførelse af alle huse. For de huse, hvor BYG.DTU og By og Byg ikke har været direkte involveret i disse faser, er der imidlertid anvendt nogle nye interessante typer højisolerede klimaskærmskonstruktioner, som betyder at disse huse med fordel kunne indgå i projektet.

1.4 Nye energibestemmelser og varmeisoleringskrav

I forbindelse med den forventede kommende skærpelse af bygningsreglementets energibestemmelser i år 2005 er det overvejende sandsynligt at bygningsreglementets krav samtidig ændres fra bygningsdeles varmetabskoefficient til samlet bruttoenergiforbrug.

I september 2001 udsendte Statens Byggeforskningsinstitut (By og Byg) et oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 (og skitser til bestemmelser i år 2012) [2]. Heri er lagt op til at bygninger skal opfylde krav til det samlede energiforbrug (energibehovet til opvarmning, ventilation og køling i form af både varme og el), og altså ikke som nu kun varmekonsumet til opvarmning og ventilation. Dette betyder at der vil komme mere fokus på energieffektiv bygningsudformning og installationer samt størst mulig udnyttelse af solenergi. Energibehovet bestemmes som summen af varmebehovene plus 3 gange summen af el-behovene. Denne faktor 3 svarer nogenlunde til prisforskel og forskel på primær energiforbrug og miljøbelastning ved henholdsvis varme- og elforbrug. Varme- og el-produktion fra solenergianlæg (solvarme- og solcelleanlæg) i bygningen kan modregnes.

For bygninger opvarmet til mindst 18 °C er der altså lagt op til at hovedkravet bliver en energiramme (bruttoenergiforbrug), men der bliver dog mulighed for at benytte en forenklet eftervisning (U-værdikrav/varmetabsramme) under forudsætning af at en række nærmere specificerede krav vedrørende bygningens energieffektivitet er opfyldt. Bygninger opvarmet til mindst 5 °C vil som i dag skulle opfylde varmeisoleringskrav til de enkelte bygningsdele (mindste varmeisolering). I tabel 1 og 2 er vist en oversigt over det nuværende, dvs. Bygningsreglement 1995

(BR95) [3] og kommende bygningsreglements krav til varmeisolering af bygningsdele og samlinger.

Tabel 1. Bygningsdele, krav til U-værdier ($\text{W/m}^2\text{K}$).

Bygningsdel	Opv. til mindst 18 °C		Mindste varmeisolering	
	BR95	BR2005	BR95	BR2005
Ydervægfacader	0,30/0,20	0,18	0,40	0,30
Terrændæk u. gulvvarme	0,20	0,15	0,30	0,30
Terrændæk m. gulvvarme	0,15	0,12	0,30	0,20
Terrændæk, industrigulve	-	-	0,60	0,50
Loft- og tagkonstruktioner	0,15	0,12	0,25	0,25
Flade tage	0,20	0,15	0,25	0,25
Vinduer og yderdøre	1,80	1,50	2,90	2,90

Tabel 2. Samlinger, krav til linietab i W/mK .

Samling	Opv. til mindst 18 °C		Mindste varmeisolering	
	BR95	BR2005	BR95	BR2005
Ydervægsgfundamenter	0,25	0,15	0,60	0,40
Ydervægsgfund. ved gulvvarme	0,20	0,12	0,60	0,30
Vinduestilslutninger	0,03	(0,00)	0,10	0,06
Vindues-/ovenlystilslutning i tag	0,10	0,08	0,30	0,20

Som det fremgår af tabellerne er der lagt op til en væsentlig skærpelse af varmeisoleringskravet til tunge ydervægfacader, idet U-værdi kravet reduceres fra 0,30 til 0,18 for normalt opvarmede bygninger og fra 0,40 til 0,30 for bygninger opvarmet til mellem 5 og 18 °C.

Med hensyn til energirammen for opvarmning er den i BR-95 $280 \text{ MJ/m}^2 \sim 78 \text{ kWh/m}^2$ for én-etages bygninger, og ved en reduktion på 33 % fås en energiramme for opvarmning på ca. $188 \text{ MJ/m}^2 \sim 52 \text{ kWh/m}^2$.

Rapporten giver dog adskillige gode eksempler på at det ikke er et problem at opfylde disse skærpede krav. For fundamenteres linietabskoefficient skærpes kravene ligeledes væsentligt, men igen er der tale om skærpelser som uden problemer kan opfyldes uafhængigt af hvilket byggesystem der er tale om.

Det skal her nævnes, at begge de projekter som er beskrevet i nærværende rapport, er igangsat inden bruttoenergiramme-begrebet så dagens lys. Dette betyder at udgangspunktet for projekterne udelukkende har været en reduktion af energiforbrug til opvarmning og ventilation, og der er således ikke fokuseret på de øvrige områder som indgår i bruttoenergirammen. Bruttoenergi-rammerne for forsøgshusene er alligevel medtaget i nærværende rapport, således at metoden belyses og betydningsen anskueliggøres.

2 FORSØGSHUSENE

2.1 Baggrund for valg af byggetekniske løsninger og installationer

Udgangspunktet ved valg af konstruktioner og installationer har dels været kravet om minimum 33 % mindre varmebehov i forhold til den nugældende energiramme, dels ønsket om at minimere de samlede anlægsudgifter og varmeudgifter i husets levetid, svarende til en totaløkonomisk synsvinkel. Valget af løsninger har naturligvis også været påvirket af statiske, byggetekniske og arkitektoniske overvejelser.

Udvikling af et energirigtigt hus med et lavt opvarmningsbehov og et godt indeklima, kræver en passende anvendelse af forskellige tiltag på følgende områder:

Klimaskærmens isolering:

- Lofts-/tagkonstruktion
- Ydervæg
- Terrændæk
- Vinduer og døre

Klimaskærmens lufttæthed:

- Infiltration

Bygningens geometri

- Form og orientering

Udnyttelse af passiv solvarme:

- Udformning og placering af vinduer
- Orientering af glasarealer

Regulering af passiv solvarme:

- Solafskærmning (passiv og/eller aktiv)

Ventilationssystem:

- Effektivt (høj temperaturvirkningsgrad)
- Energieffektivt (lavt el-forbrug)
- God komfort

Varmeanlæg:

- Effektivt (høj nyttevirkning)
- Placering af og isolering af varmerør

Isolering af klimaskærmen, herunder brug af energirigtige vinduer (energiruder), udgør de mest oplagte måder at reducere opvarmningsbehovet på. En større isoleringstykkelse end normalt etableres nemt i loft og terrændæk ved nybyggeri, mens det er mere problematisk i ydervæggen. En forøget isolering i ydervæggen indvirker på udformningen af fundament, vinduestilslutninger og tagfod, og betyder at bruttoetagearealet øges for et fastholdt indvendigt areal.

Klimaskærmens lufttæthed er af stor betydning, specielt når der benyttes mekanisk ventilation med varmegenvinding. Hvis klimaskærmen er for utæt i et hus med varmegenvinding på ventilationsluften, svarer det til at man kortslutter systemet og dermed reduceres varmebesparelsen væsentligt. I naturligt ventilerede huse bør man ligeledes tilstræbe en god lufttæthed af klimaskærmen, således at luftskiftet, og dermed varmetabet, kan kontrolleres bedst muligt. For at opnå en god tæthed af klimaskærmen skal konstruktioner/samlinger så vidt muligt beskyttes mod gennembrydning af diverse tekniske installationer, og det er endvidere vigtigt at planlægge denne

del af bygningen grundigt inden den opføres. Håndværkerne, som arbejder med huset, skal samtidig have udførlige instruktioner i hvorledes tætheden sikres og fastholdes hele vejen igennem byggefasen.

En bygnings form og orientering kan ikke ændres, når først bygningen er opført, så det er vigtigt at være opmærksom på at form og orientering har forholdsvis stor betydning for energiforbruget. Udformes et typisk enfamilieshus på 144 m² hus rektangulært (24x6m) frem for kvadratisk (12x12m) vil vægarealet og fundamentslængden blive 25 % større, og det samme vil varmetabet via ydervægge og fundament.

For at udnytte den passive solvarme optimalt må der tages hensyn til udnyttelsen i forbindelse med projekteringsfasen. Typisk vil energiruder give anledning til et positivt energitilskud. På baggrund af det danske referenceår DRY [4], gælder for fyringssæsonen, at den transmitterede solstråling gennem sydvendte ruder vil være 2,7 gange større end varmetabet. For øst- og vestvendte ruder vil forholdet være 1,5 og for nordvendte vinduer vil der netto være et varmetab. I sommerperioden vil soltilskuddet naturligvis være større. Udformningen af vinduerne er ligeledes vigtig, idet brede karme, sprusser og lignende reducerer solindfaldet og forøger transmissionstabet for vinduerne.

Stort solindfald kan imidlertid også give anledning til ubehagelig overophedning af rummene, især om sommeren. Ved hensigtsmæssig udformning af tagudhæng eller anden solafskærmning kan vinterens varmetilskud udnyttes uden nogen gene om sommeren. I ”Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 4” [5] er disse og øvrige forhold beskrevet nærmere.

I forbindelse med valget af ventilationssystem er det vigtigt at der tages udgangspunkt i et system som både har en høj temperaturvirkningsgrad (tæt på 90 %) og samtidig har et lavt el-forbrug (ventilatorer). Disse anlæg findes på markedet i dag. Teknologisk Institut (TI) gennemfører prøvninger af mekanisk ventilation med varmegenvinding, og dokumenterer anlæggenes ydeevne i prøverapporter, og sådanne prøverapporter bør rekvireres i forbindelse med valg af anlæg. I rapporten ”Udvikling og optimering af et energieffektivt straightner ventilationsaggregat med indbygget chopper varmeveksler” [6] er foretaget detaljerede analyser af ventilationsanlæg, og heri fokuseres bl.a. på anlæggenes el-effektivitet.

Varmeanlægget bør, ligesom ventilationsanlægget, vælges ud fra et ønske om en høj effektivitet og et lavt el-forbrug. I rapporten ”Udformning og styring af energirigtige gulvvarmeanlæg” [7] er der foretaget detaljerede analyser af gulvvarmeanlæg, og bl.a. er det analyseret hvilken betydning det har for opvarmningsbehovet for et hus, hvis fremløbstemperaturen i anlægget styres efter en udetemperaturføler (vejrkomensation).

For de forsøgshuse, som BYG•DTU har været med til at udvikle, har fremgangsmåden i projekteringen/udviklingen været at analysere forskellige energibesparende løsninger hver for sig, og derefter integrere de bedste løsninger i samlede analyser, hvorved deres indbyrdes påvirkning belyses. Til analyserne benyttes BSIM beregningsprogrammet som muliggør variation af en lang række parametre i bygningsmodellen og hvor effekten af effektiv varmekapacitet, solindfald samt detaljerede beskrivelser af de anvendte systemer indgår. Til analyse af flerdimensionale varmestrømme benyttes programmerne HEAT2 [8], HEAT3 [9] og THERM [10].

2.2 Udformningen

I nedenstående tabel 3 er redegjort for forsøgshusenes overordnede udformning. Facader, planer og snit fremgår af det efterfølgende kapitel ”Byggetekniske løsninger”.

Tabel 3. Beskrivelse af de enkelte huse. Alle huse er enfamiliehuse.

Hus	Byggefirma	Beliggenhed	Byggesystem	Hustype
A	Lind & Risør	Snekkersten	Skalmuret porebetonelement	Fritliggende, ét plan
B	SHS Byg	Lemvig	Ydervægselement i stålskelet	Fritliggende, ét plan
C	Danhaus	Hillerød	Skalmuret træskeletelement	Fritliggende, 1½ plan
D	Thyholm Murer	Thyholm	Fuldmuret	Dobbelthus, ét plan
E	Bülow & Nielsen	Brøndby Str.	Skalmuret porebetonelement	Fritliggende, ét plan
F	Eurodan Huse	Opføres ikke	Helvægselement, letklinkerbeton	Fritliggende, ét plan

Husene repræsenterer de mest almindelige byggesystemer i Danmark. Alle huse, på nær huset i Hillerød, er forsynet med fjernvarme, og har gulvvarme samt mekanisk ventilation med varmegenvinding. Huset i Hillerød er forsynet med naturgas og har kombineret gulvvarme-/radiatoropvarmning og er naturligt ventileret.

2.3 Arealer mm.

Forsøgshusenes bruttoetageareal varierer mellem 88 m² og 175 m². I ”vinduesareal” indgår også areal af yderdøre. I tabel 4 er redegjort for arealer og indvendigt rumvolumen.

Tabel 4. Husenes arealer og rumvolumen.

Hus	Bruttoetageareal [m ²]	Boligareal* [m ²]	Ydervægsareal** [m ²]	Vinduesareal [m ²]	Vinduesareal i % af bruttoetageareal [%]	Indv. rumvolumen [m ³]
A	135	111	78	30	22	263
B	145	115	93	26	18	285
C	153	131	136***	35	23	303
D	88	74	43	23	26	167
E	133	111	77	37	28	259
F	175	148	117	37	21	351

* Gulvareal for husets rum (sum af indvendige arealer i hvert rum).

** Indvendige mål.

*** Hus C er i 2 plan, og ydervægsarealet består derfor af vægge i stueetagen samt skunk- og skråvægge på 1. sal.

Reglerne i BR95 angiver et maksimalt tilladeligt vinduesareal på 22 % af bruttoetagearealet, med mindre der gennem forøgede isoleringstykkelser kompenseres for det ekstra varmetab gennem de større vinduesarealer (udnyttelse af varmetabsrammen). Forsøgshusene har væsentlig større isoleringstykkelser end foreskrevet i BR95, så varmetabsrammen kan nemt opfyldes. Da yderligere en stor del af vinduerne er placeret i husenes sydfacader, vil de give et positivt bidrag til husenes energibalancer.

I tabel 5 er vist en oversigt over husenes glasarealer og deres orientering. En angivelse af et bestemt glasareal mod f.eks. syd, betyder ikke at fladen er orienteret præcist mod syd, men overvejende mod syd. Ud fra situations- og grundplanerne i afsnittet ”Byggetekniske løsninger”, kan man danne sig et overblik over glasarealernes orientering for de forskellige huse.

Der er i tabellen også medtaget en angivelse af om der i rudekanten er anvendt et ikke-metallisk afstandsprofil, en såkaldt ”varm rudekant”. Alle huse er udstyret med 2-lags energiruder, hvor hulrummet imellem glaslagene er fyldt med argon. Argon er en luftart, som isolerer bedre end almindelig luft. Derudover har energirudens indvendige glas en lavemissionsbelægning på den side af glasset, der vender ind imod hulrummet. Belægningen reducerer varmetransport ved varmestråling gennem rudens hulrum. De anvendte energiruder har en isoleringsevne, der er ca. 3 gange bedre end traditionelle luftfyldte termoruder.

Tabel 5. Transparente glasarealer for de enkelte huse. Alle huse er udstyret med 2-lags energiruder.

Hus	Glasareal					Samlet vinduesareal [m ²]	Samlet UA-værdi [W/K]	”Varm rudekant”
	Syd	Nord	Øst	Vest	I alt			
A	0,4	3,9	4,6	9,7	18,6	30	43,9	√
B	7,8	5,0	0,5	2,7	16,0	26	40,7	÷
C	6,1	4,1	4,1	8,7	23,0	35	60,1	÷
D	1,9	0,0	6,6	7,8	16,3	23	30,4	√
E	6,8	1,6	6,7	12,7	27,8	37	59,9	÷
F	6,4	8,0	2,4	5,3	22,1	37	52,9	÷

2.4 Solafskærmning

Der er i ét forsøgshus (hus A) foretaget analyser til bestemmelse af en hensigtsmæssig udformning af tagudhænget. I hus B og D er et tagudhæng undladt af arkitektoniske grunde. For hus B’s vedkommende er vinduesarealet dog så lille og velvalgt, at et acceptabelt indeklima må forventes. Hus D har et relativt stort vinduesareal, men er i overvejende grad orienteret mod øst og vest. Hus C har et relativt lille udhæng, men som det fremgår af de senere analyser af indeklimaet, skaber dette ikke problemer i forbindelse med solindfaldet om sommeren. Hus E og F har begge relativt store tagudhæng, og analyser viser da også at der ikke vil være problemer med overophedning.

Et udhæng eller anden form for afskærmning mod varmeudstråling til himlen, vil også mindske problemer med udvendig kondens på glasoverflader, som det af og til ses i forbindelse med typiske energiruder. Problemet med kondens øges ved yderligere forbedring af rudens isoleringsevne, eksempelvis for 3-lags energiruder.

2.5 Lufttæthed

Der har været særlig opmærksomhed på lufttætheden, ikke alene i projekteringsfasen, men også under husenes opførelse. Det hænger sammen med, at stor lufttæthed (lav infiltration) er ønskelig for at begrænse ventilationstabet til det, der knytter sig til det kontrollerede friskluftskifte. Høj grad af lufttæthed er nødvendig for at opnå en god effektivitet på de installerede varmevekslere til varmegenvinding fra afkastluften. Utætheder i huset kan direkte virke som ”kortslutning” af varmegenvindingen.

I hus A, D, E og F, svarende til de huse hvor BYG.DTU har deltaget aktivt i forbindelse med projekteringen, er der således arbejdet med at sikre lufttætheden af husene generelt. Hus F opføres, som tidligere omtalt ikke, og derfor er tiltag vedrørende lufttætheden ikke ført ud i praksis, men der har været fokuseret på det i forbindelse med projekteringen.

Det er vigtigt i forbindelse med procesrækkefølgen ved opbygningen af loft- og tagkonstruktioner at taget er tæt overfor regn før dampspærre og isolering etableres. I forbindelse med hus E var dette ikke tilfældet, og derfor samledes der vand på oversiden af dampspærren inden konstruktionen blev lukket. Vandet blev drænet ved perforering af dampspærren inden loftsisoleringen blev udlagt, og efterfølgende blev perforeringerne lappet grundigt med tape.

I næste kapitel, ”Byggetekniske Løsninger” gennemgås, for de forsøgshuse hvor BYG.DTU har deltaget aktivt i projekteringen, bl.a. de tiltag som er gjort for at opnå en høj grad af lufttæthed.

3 BYGGETEKNISKE LØSNINGER

I dette afsnit beskrives hus for hus de valgte byggetekniske løsninger. Først følger en side med facader, snit og planer og efterfølgende mere detaljerede snit med forklarende tekst.

Som nævnt tidligere har BYG•DTU og By og Byg været direkte involveret i udviklingen og projekteringen af hus A, D, E og F, mens de øvrige huse er medtaget i projektet, da de indeholder nye og interessante højisolerede klimaskærmskonstruktioner.

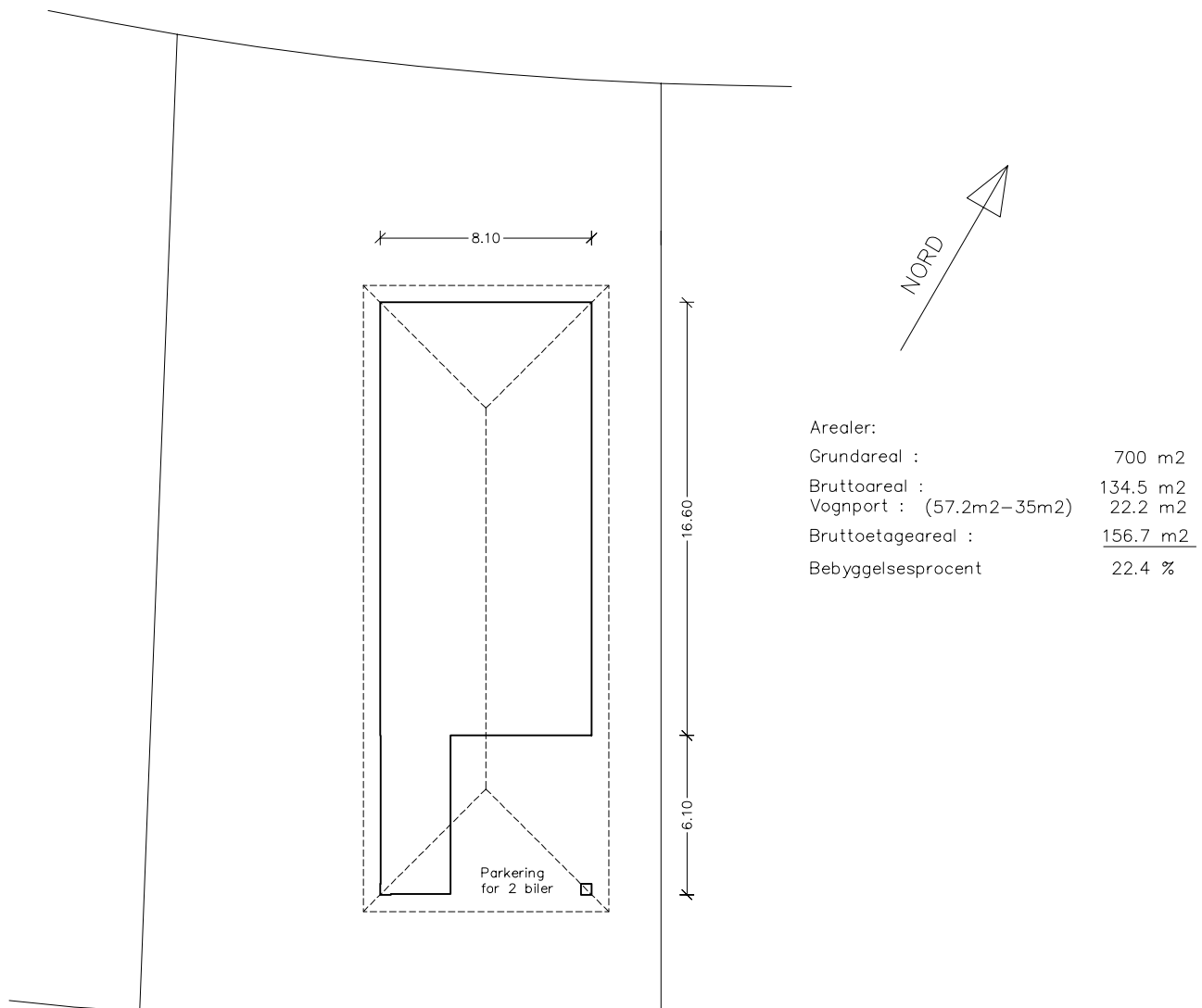
3.1 Hus A. Skalmurede porebetonelementer



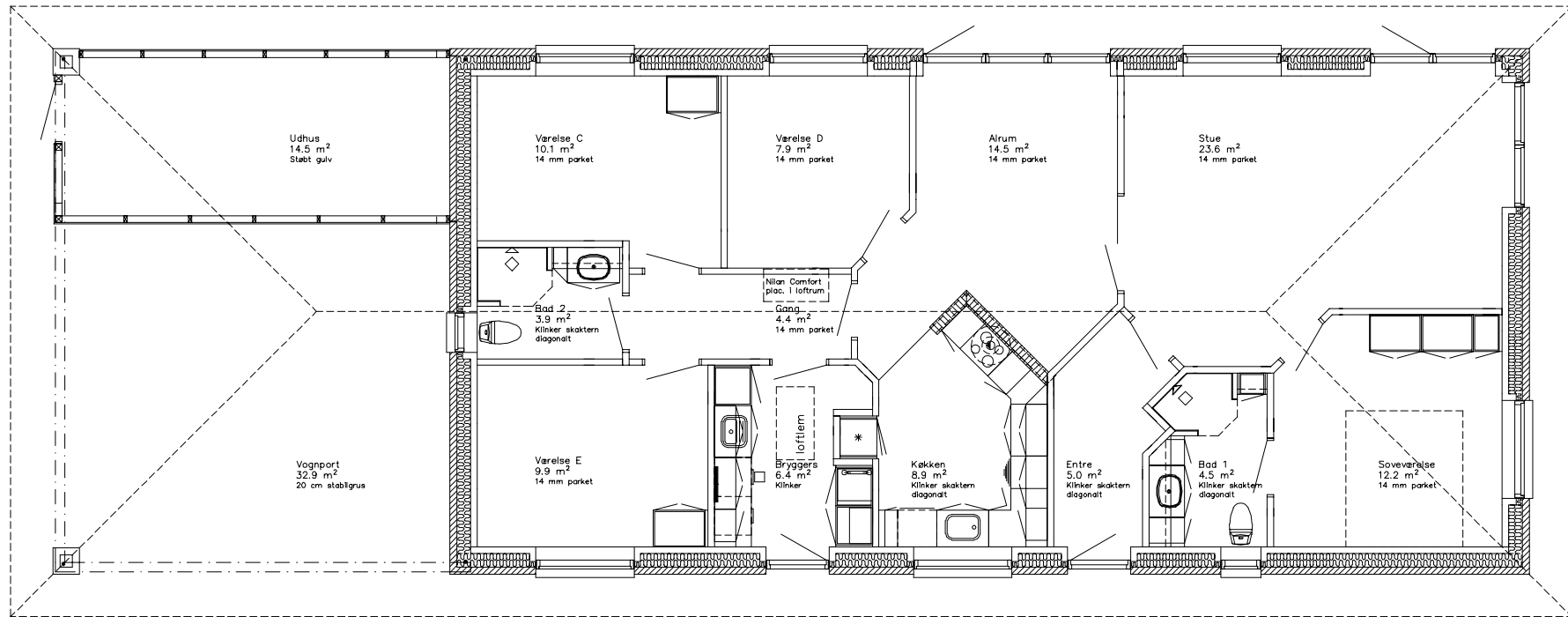
Figur 1. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Opført i Snekkersten.

Hustype:	Fritliggende længehus med valmhus-arkitektur – 135 m ²
Byggesystem:	Skalmurede porebetonelementer
Byggefirma:	Lind & Risør

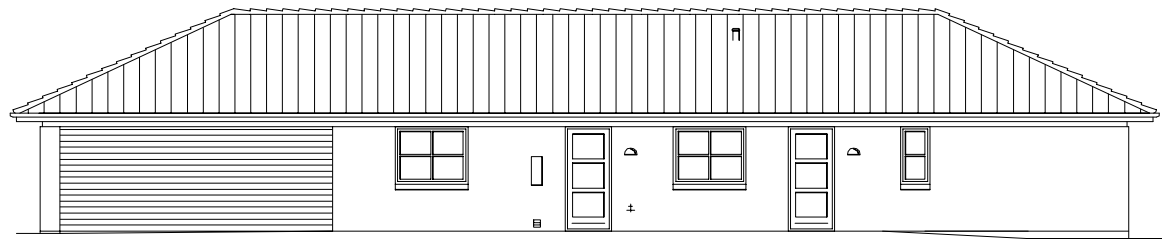
Huset består af en stor stue og køkken/alrum, fire værelser, bryggers, entré og to baderum/WC. I figur 2a – 2c er vist en beliggenhedsplan, plantegning og facader.



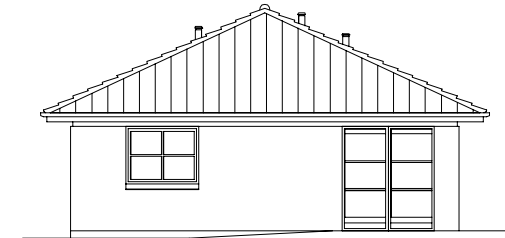
Figur 2a. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Beliggenhedsplan.



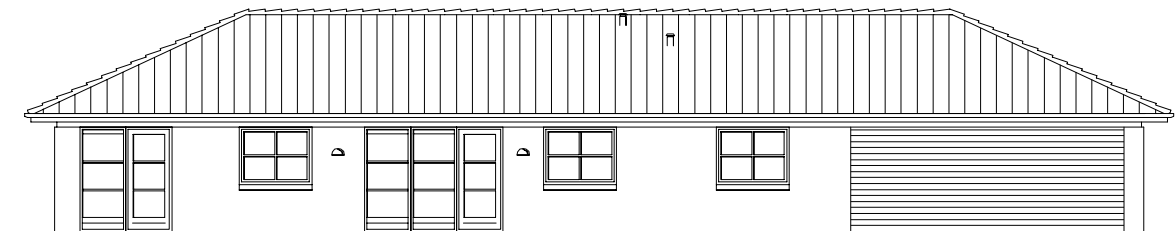
Figur 2b. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Plantegning.



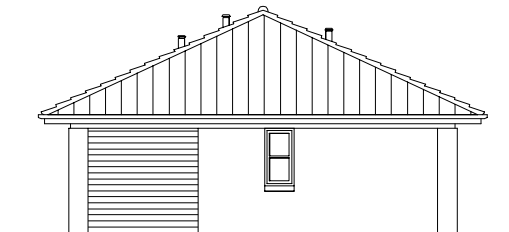
Facade mod Øst



Gavl mod Nord



Facade mod Vest



Gavl mod Syd

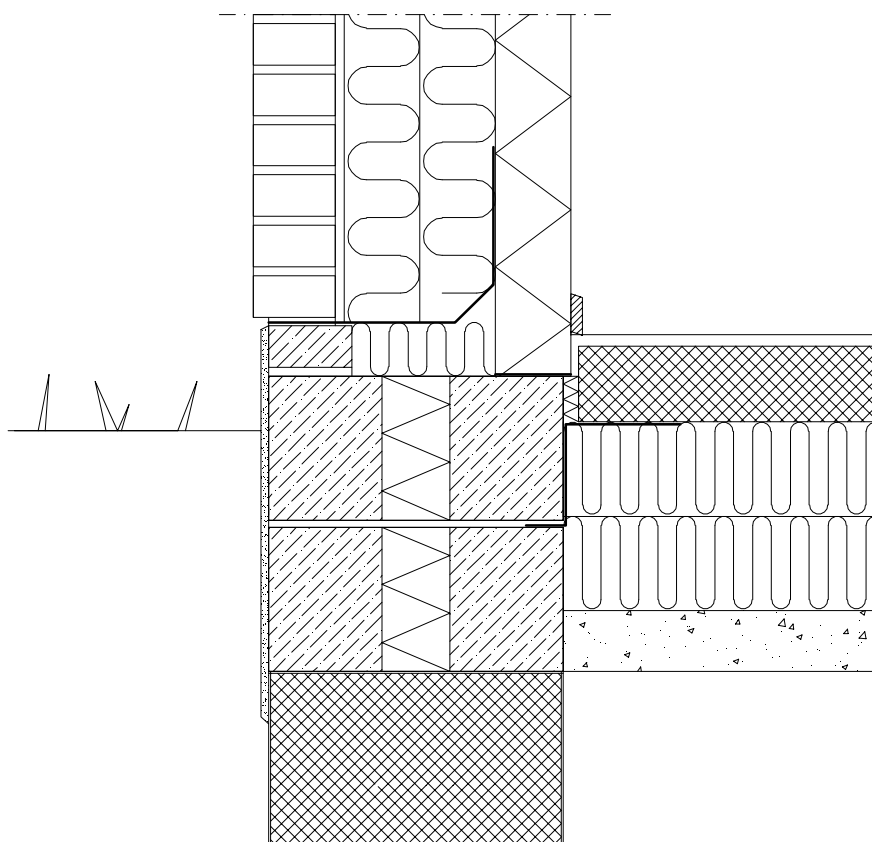
Figur 2c. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Facader.

3.1.1 Terrændæk

Konstruktionen består, regnet nedefra, af 75 mm singels, 250 mm ekspanderet polystyren, 100 mm fiberbeton med gulvvarmeslanger og armeringsnet samt gulvbelægning i form af 14 mm parket, undtagen i baderum, køkken, entre og bryggers, som er klinkebelagt. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.1.2 Fundament

Fundamentet er udført i letklinkerbeton med ca. 90 mm midterisolering og adskilt fra betonklaplaget med 20 mm isolering, se figur 3. Fundamentet er naturligvis udformet lidt anderledes ved døre-/glaspartier, hvor der er etableret 40 mm isolering mellem sokkel og betonlag (se figur 7).



Figur 3. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Ydervægsgfundament.

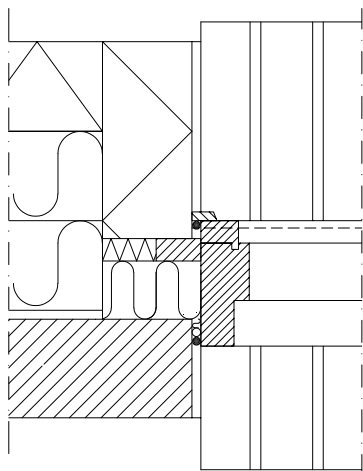
3.1.3 Ydervæg

Konstruktionen består af en 420 mm hulmur af teglsten og letbeton. Formuren består af 110 mm teglsten og bagmuren af 100 mm porebetonelementer, som er forbundet med ca. 7 stk. trådbindere pr. m² af 4 mm rustfrit stål. Muren er isoleret med 200 mm mineraluld udført som to lag af 100 mm. Isoleringen er fastholdt mod plan bagmur. De to lag er anbragt med forskudte lodrette samlinger.

3.1.4 Vinduestilslutninger

Ved vinduer/døres lodrette sider er af styrke- og afdækningsmæssige hensyn udført falselementer (100 x 220 mm), og ved vinduers underfals er udført falselement og muret rulleskifte. Kuldebroisoleringen er ca. 80 mm ved begge false. Over de smalle vinduer er anbragt en 190 x 100 mm letbetonbjælke, og bjælken over døre i bryggers og entre har dimensionen 190 x 150 mm. Over

brede vinduer samt rumhøje glaspartier i stue er anbragt 260 x 150 mm limtræ-bjælker. Kuldebroisoleringen ved overfalsen er ca. 100 mm ved limtræ-bjælker og ca. 70 mm ved øvrige overfelse. I figur 4 er vist et vandret snit i sidefalsen.



Figur 4. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Vandret snit i sidefals.

3.1.5 Indervæg

Alle indervægge er udført af 100 mm porebetonelementer.

3.1.6 Loft-/tagkonstruktion

Konstruktion består, regnet nedefra, af:

2 x 13 mm gips.

Krydsforskalling 22 x 100 mm pr. 400 mm fastgjort til spredt forskalling 28 x 95 mm pr. 600 mm.

Forskalling er fastgjort til 45 x 145 mm spærfodder pr. 1,2 m.

Dampspærre (plastfolie 0,15 mm) er placeret beskyttet mellem forskalling og spærfod.

150 mm mineraluld mellem spærfodder.

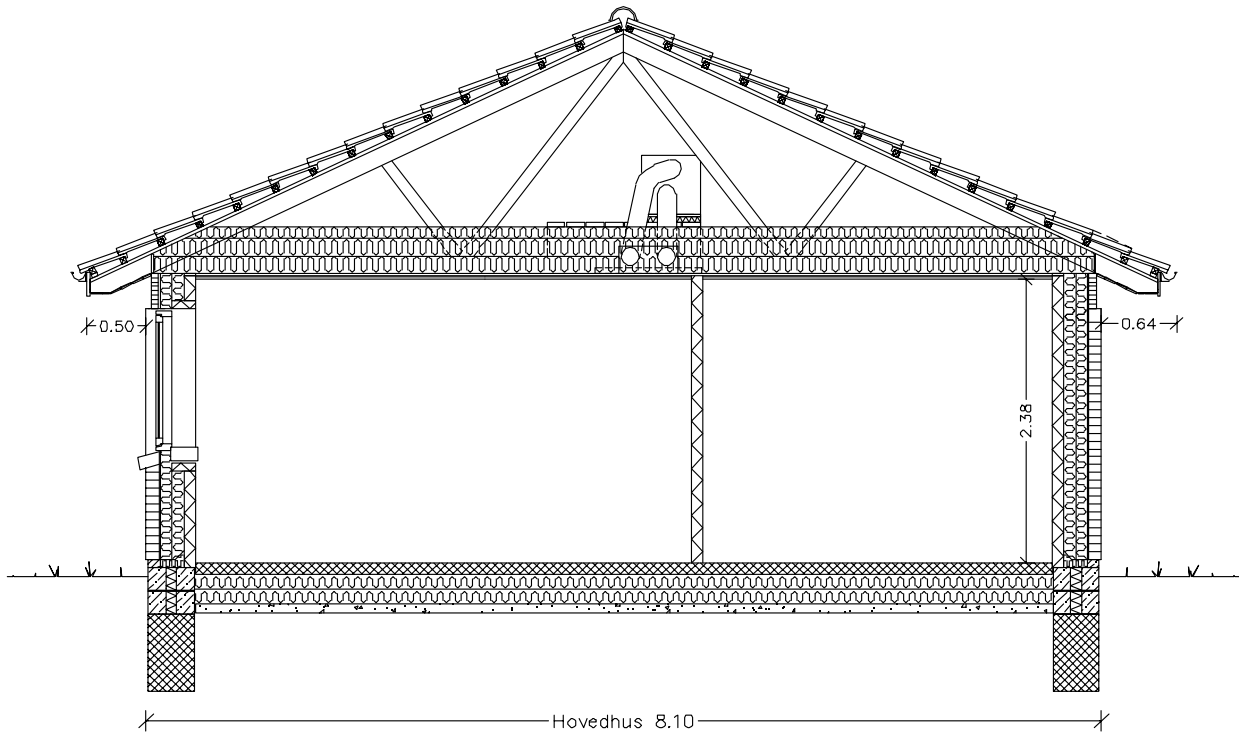
250 mm ubrudt mineraluld i to lag over spærfodder.

Ventileret tagrum og tagsten på lægter med vindtæt undertag. Tagrummet ventileres via 50 mm åbninger ved tagfod i hvert 3. spærfag.

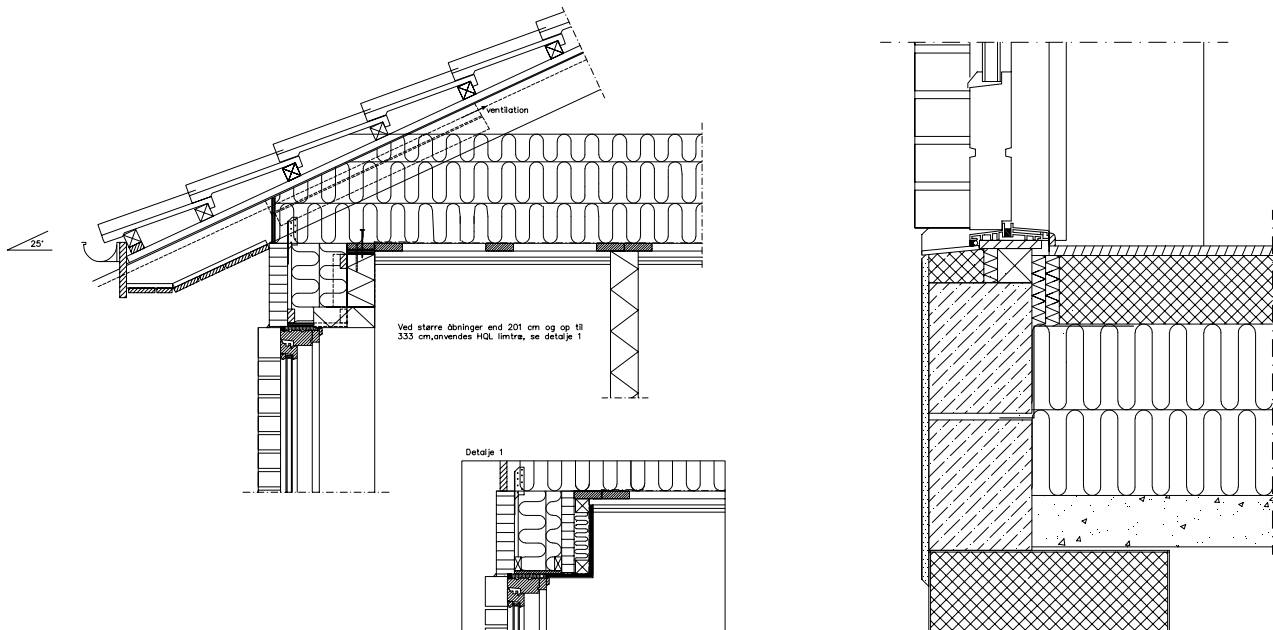
Der er anvendt en ny type spærfodsløsning, idet denne lokalt i midten er forskudt, så der er skabt plads til at fremføre ventilationskanalerne i den nederste del af loftkonstruktionen, se figur 5. Derved reduceres kanalvarmetabet til et minimum.



Figur 5. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Spærløsning anvendt i forsøgshuset – løsningen muliggør fremføring af ventilationskanaler i den nederste del af loftkonstruktionen.



Figur 6. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Tværsnit.



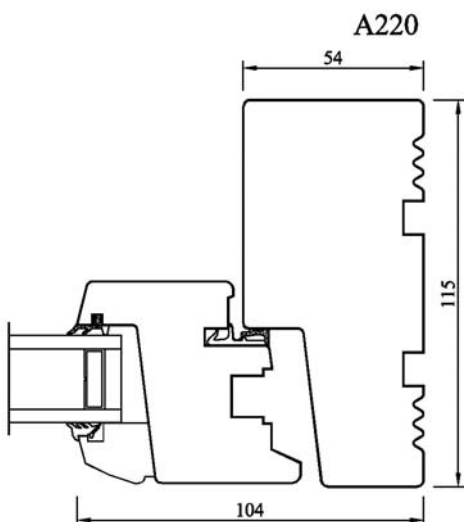
Figur 7. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Lodret snit i tagkonstruktion ved tagfod og fundament ved yderdøre/glaspartier.

3.1.7 Vinduer og døre

Vinduer og døre er typiske trævinduer (type Rationel Domus) med sprosser. Ramme-karm profilet har som standard en tykkelse på 115 mm, men i huset er anvendt en 25 mm karm påforing, således at det har været muligt at øge kuldebroisoleringen i falsen tilsvarende.

Der er anvendt typiske energiruder, svarende til type SGG Climaplust fra Scanglas, der har en U-værdi på $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en total solenergitransmittans på 63 %. I rudekanten er der anvendt et ikke-metallisk afstandsprofil i form af produktet Swisspacer V, hvilket reducerer varmetabet betydeligt, i forhold til de normalt anvendte profiler i galvaniseret stål eller aluminium.

I figur 8 er vist et typisk snit i ramme-/karmprofilet.



Figur 8. Hus A. Skalmurede porebetonelementer. Typisk snit i ramme-/karmprofil.

3.1.8 Lufttæthed

Generelt er der sørget for at foretage en grundig tætning med tape af samlinger mellem plastfoliebanerne i loftskonstruktioner. I samlingen mellem ydervæg og loftskonstruktion er der ligeledes taget særligt hensyn til lufttætheden. I hus A er plastfolien ved bagvægge ført fra loftskonstruktionen ned ad bagvæggens yderside og klemmt med liste mod gummifuge. Der er desuden udført en dobbelt forskalling i loftskonstruktionen, således at dampspærren kan placeres lidt inde i konstruktionen og dermed give plads til udførelse af elinstallationer, se figur 9. Billedet til højre i figur 9 viser rørkrave (selvklæbende EPDM dug) og tape, der sikrer tætheden, der hvor dampspærren gennembrydes af ventilationskanaler og ved plastfoliesamlinger.



Figur 9. Loftkonstruktion under opførelse. Billedet viser dels at dampspærren er placeret beskyttet, idet den er trukket tykkelsen af to forskallingslag ind i konstruktionen, og dels den rørkrave og tape der sikre tætheden hvor ventilationskanaler gennembryder dampspærren og ved plastfoliesamlinger.

For hus A udgør væggens spartling og maling lufttætheden og fugtspærren. Loftets dampspærre er for dette hus ført ned ad vægelementernes yderside og klemmt mod en strimmel fugemasse. Foliebanerne er lagt med overlæg og samlingerne er tape.

3.2 Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet



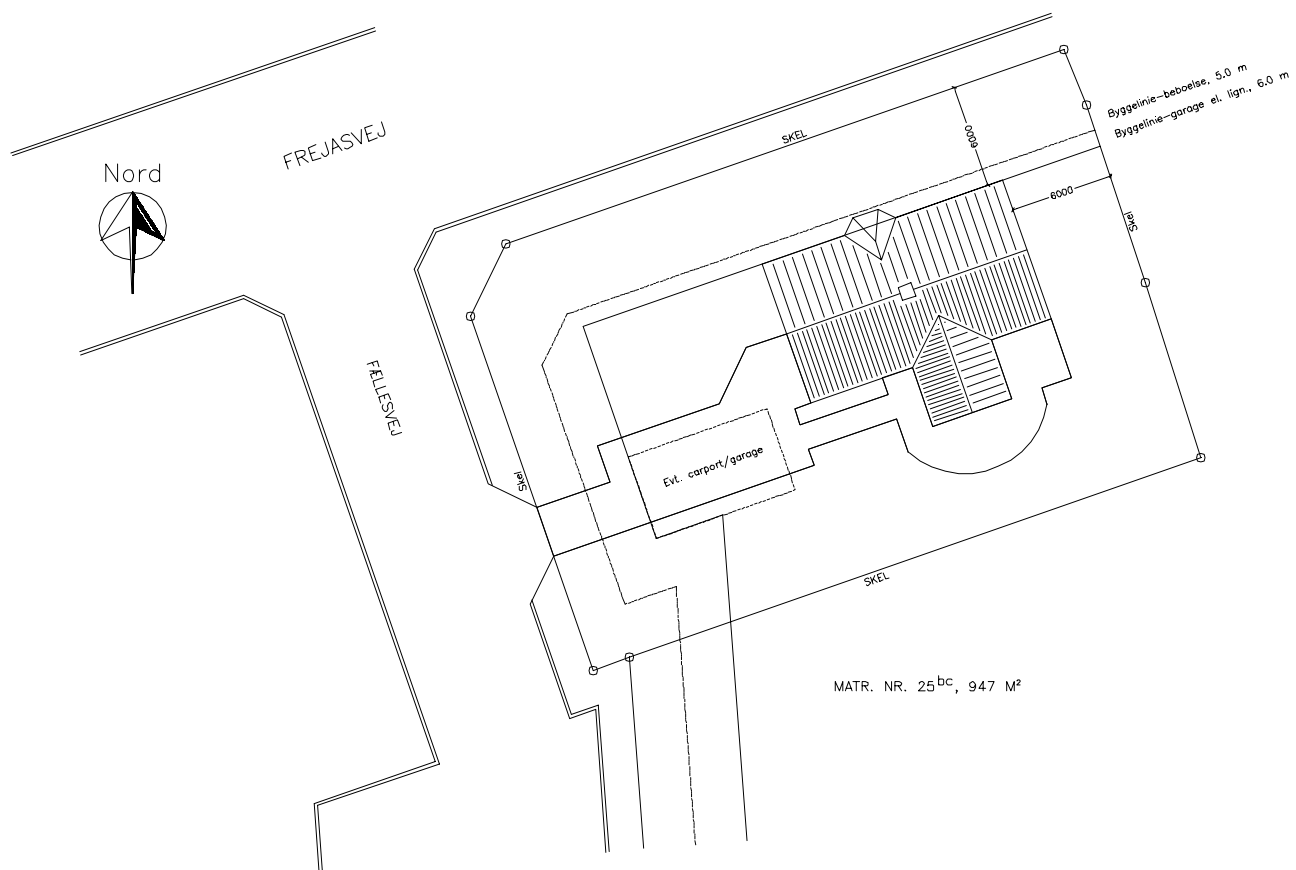
Figur 10. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Opført i Lemvig.

Hustype: Fritliggende enfamiliehus i ét plan – 145 m²

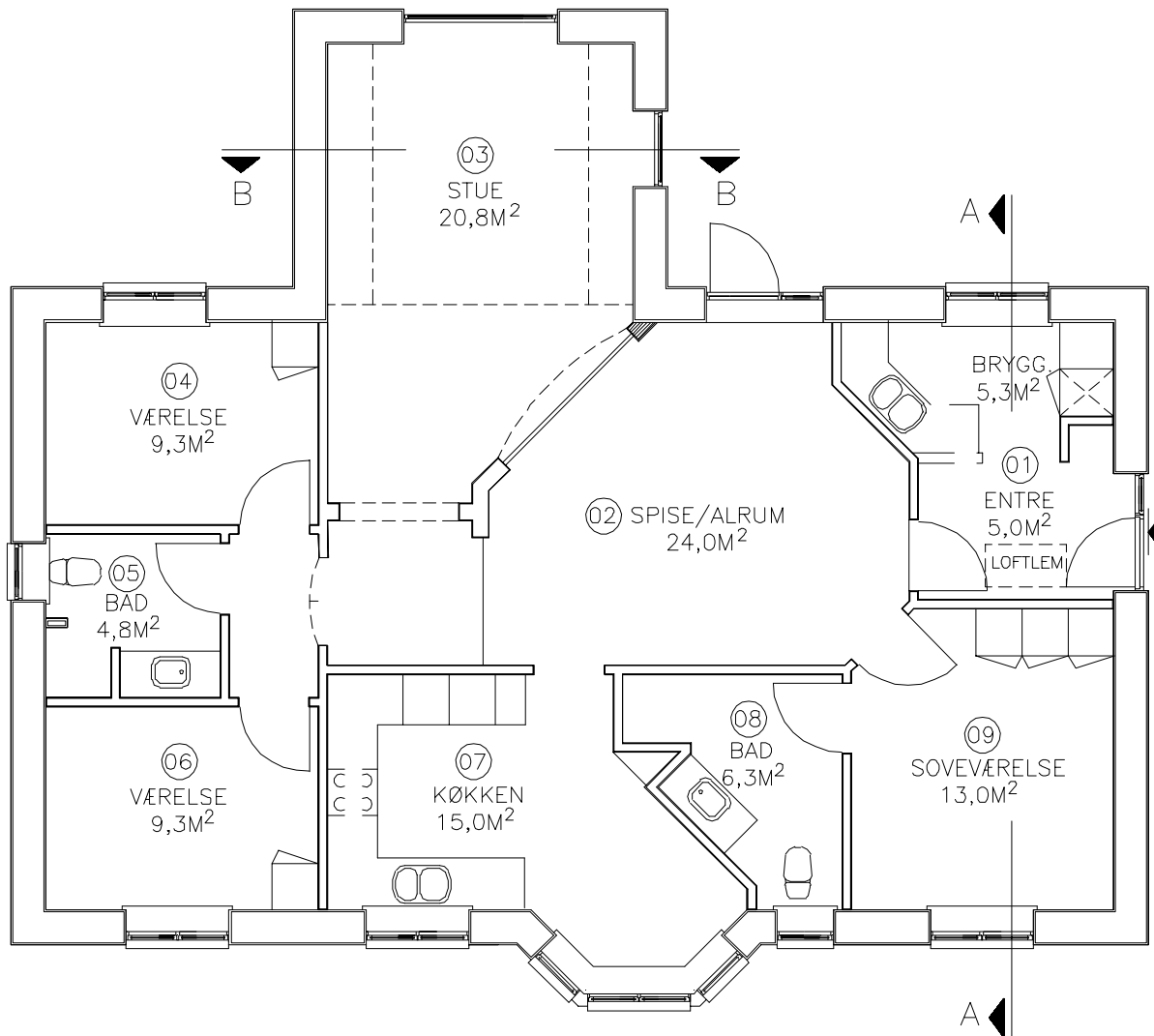
Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet

Byggefirma: SHS BYG

Huset består af en stor sammenhængende stue/spisestue/alrum, tre værelser, køkken, bryggers/entré og to baderum. I figur 11a – 11c er vist beliggenhedsplan, plantegning og facader.

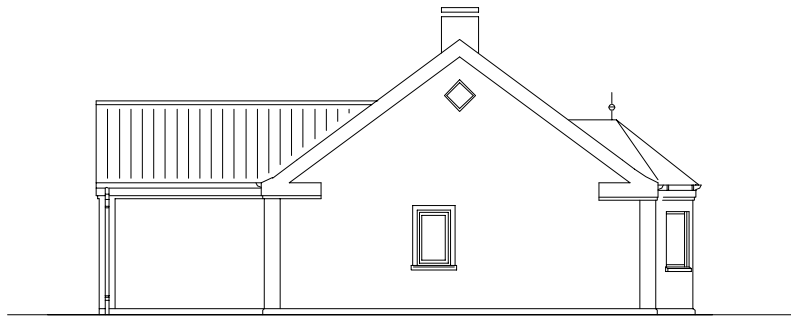


Figur 11a. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Beliggenhedsplan.

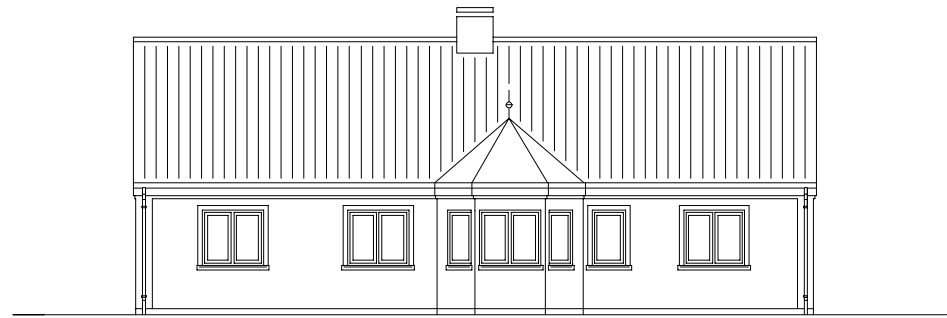


BRUTTOAREAL 145 M²

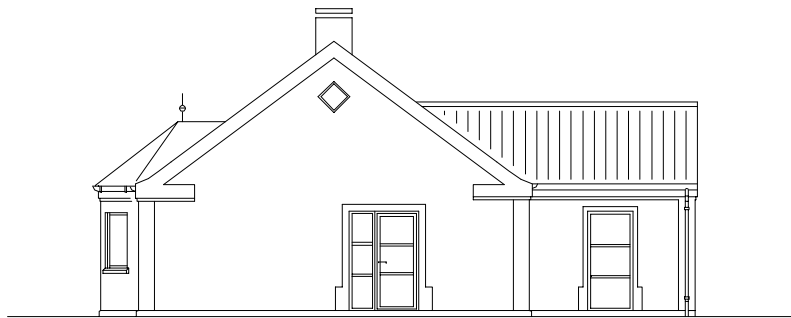
Figur 11b. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Plantegning.



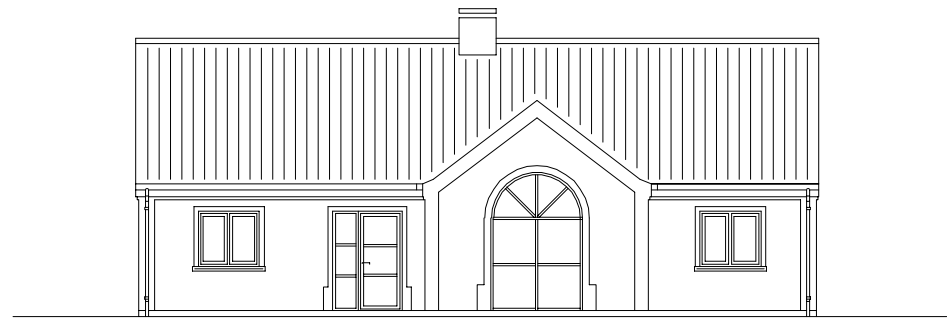
GAVL MOD ØST



FACADE MOD NORD



GAVL MOD VEST



FACADE MOD SYD

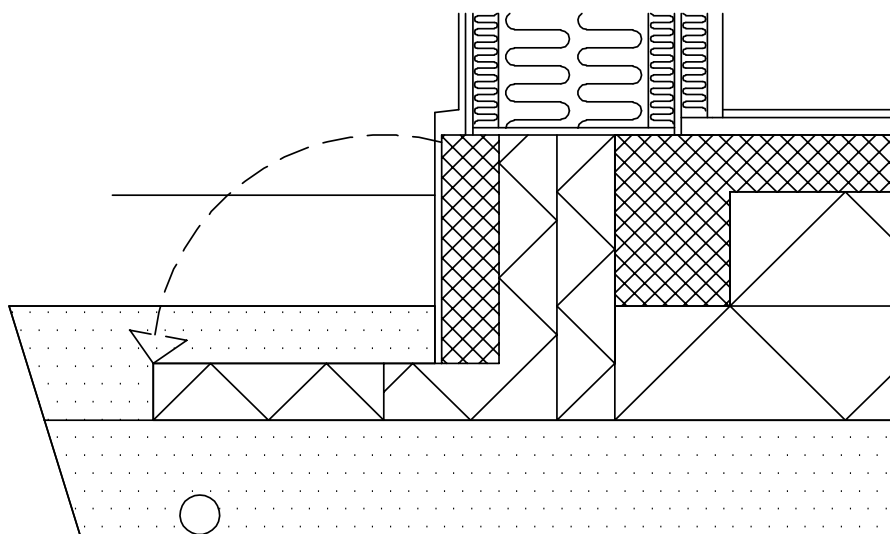
Figur 11c. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Facader.

3.2.1 Terrændæk

Konstruktionen består nedefra af 200 mm komprimeret afrettet sand, 400 mm ekspanderet polystyren, 100 mm betonklaplag med gulvvarmeslanger og armeringsnet, ca. 30 mm flyde anhydrit, dampspærre og gulvbelægning i form af 14 mm lamelparket, undtagen i baderum hvor der er klinkebelægning. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.2.2 Fundament

Fundamentet er utraditionelt, da det ikke, som det typisk er tilfældet, er ført ned til 90 cm dybde under terræn. Der er kun tale om en funderingsdybde på ca. 40 cm. Til gengæld er der udlagt 100 mm vandret isolering til sikring mod frosthævning. Fundamentet indeholder 200 mm isolering.



Figur 12. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Ydervægsfundament.

Fundamentet er udformet lidt anderledes ved døre/glaspartier, hvor der er i den øverste udvendige del er benyttet en 190 x 190 mm letklinkerbetonblok.

3.2.3 Ydervæg

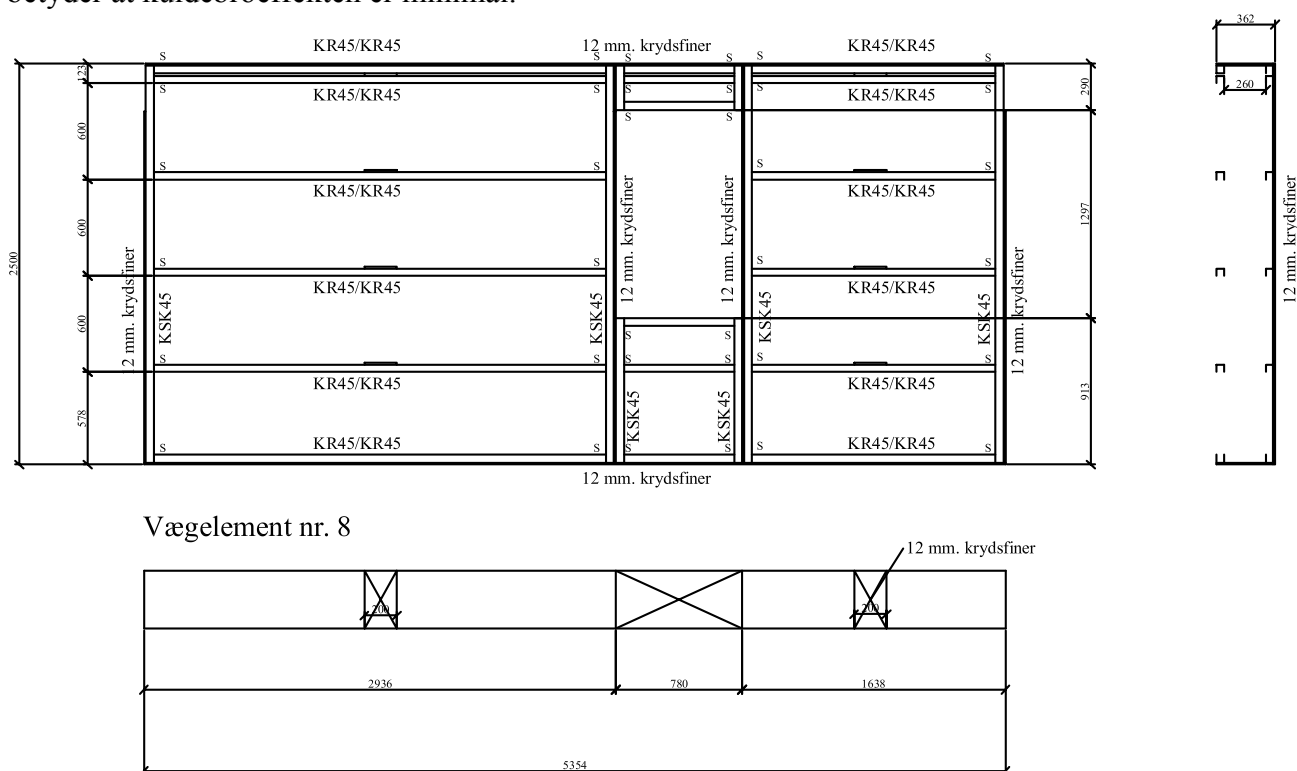
Ydervæggen består som basis af lette elementer i form af krydsfinerforbundne stålskeletter med 350 mm isolering. Indvendig er der yderligere tilføjet dampspærre, 45 mm isolering og 2x13mm gipspladebeklædning. Udvendigt er afsluttet med en 12,5 mm cementspånplade og 12 mm dekorationspuds.

Der er overalt i ydervægselementerne anvendt U-formede galvaniserede stålprofiler med godstykkelse på 1 mm, som passende steder er forbundet med 12 mm krydsfinerplader. Som lodrette profiler er anvendt typen KSK45, der har en 45 mm krop og 50 mm flanger, mens der som vandrette profiler er anvendt typen KR45, der også har en 45 mm krop og ca. 42 mm flanger.

Nedenstående figur 13 og figur 14 viser hvordan et typisk element ser ud.



Figur 13. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Typisk vægelement. Bemærk at stolperne ikke er udformet som gennemgående stålprofiler, idet kroppen er erstattet med krydsfiner. Dette betyder at kuldebroeffekten er minimal.

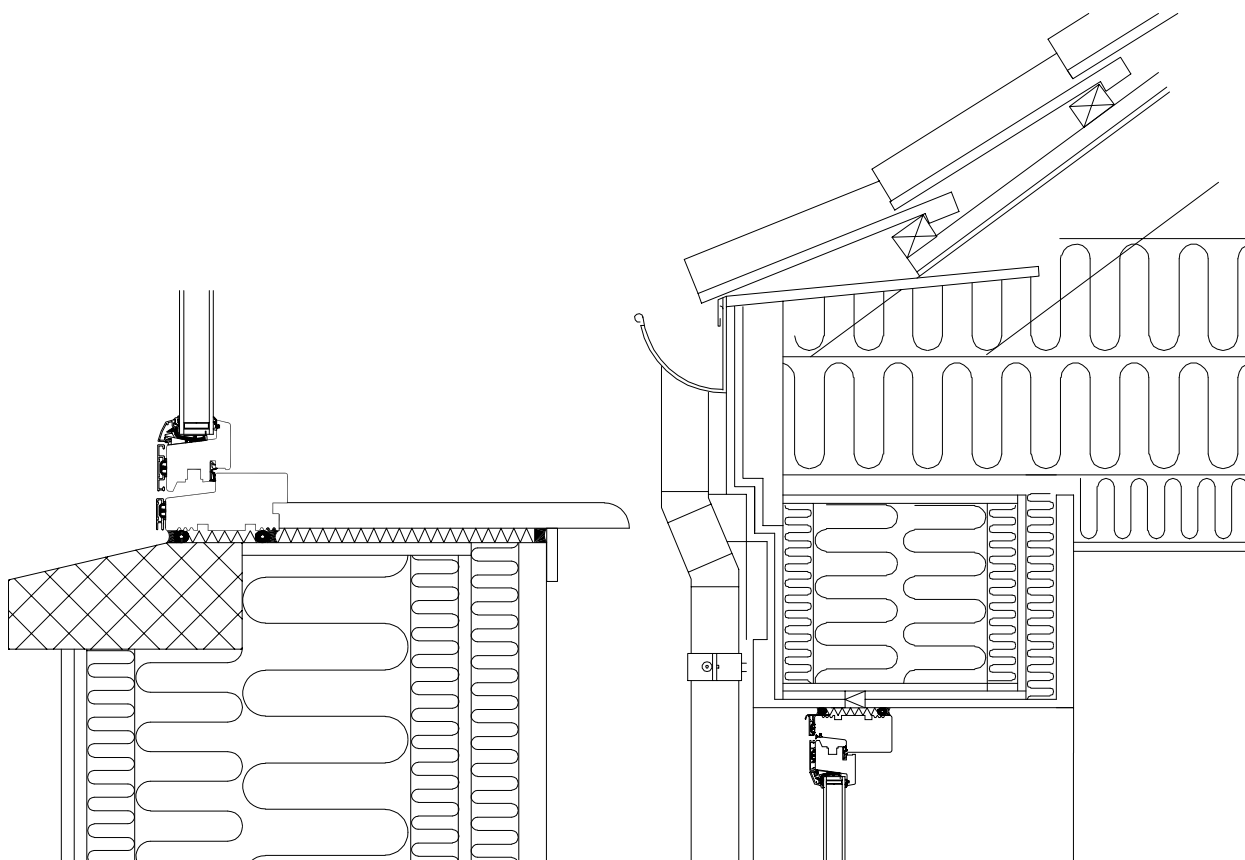


Figur 14. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Opstalt og tværsnit - typisk ydervægselement.

Ydervæggene indeholder kun kuldebroer i begrænset omfang, idet gennembrydninger af konstruktionen er foretaget med krydsfiner som kun leder varmen ca. 3 gange bedre end isoleringen.

3.2.4 Vinduestilslutninger

I figur 15 er vist lodrette snit i hhv. underfals og overfals. Sidefalsen er opbygget som overfalsen. Af figuren er det tydeligt at isoleringstykkelsen i ydervæggen ikke reduceres ved overfals og sidefals, mens man ved underfalsen reducerer isoleringstykkelsen fra 395 mm til 220 mm. Glasset er trukket ca. 100 mm tilbage i forhold til ydervæggens udvendige side.



Figur 15. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Lodret snit i hhv. underfals og overfals. Sidefals svarer til overfals.

3.2.5 Indervæg

Indvendige skillevægge er opbygget af 70 mm stållægter med 2 lag 13 mm gips på begge sider, isoleret med 50 mm mineraluld.

3.2.6 Loft-/tagkonstruktion

Konstruktion består nedefra af:

13 mm gipsplade ($\lambda=0,200$ W/mK) fastgjort til spredt forskalling (22 x 100 mm brædder pr. 0,3 m).

45 x 95 mm lægter pr. 1 m fastgjort til 45 x 145 mm spærfodder pr. 1 m.

100 mm isolering ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem lægter.

Dampspærren er placeret beskyttet mellem lægter og spærfodder, således at elinstallationer kan udføres uden væsentlig risiko for beskadigelse.

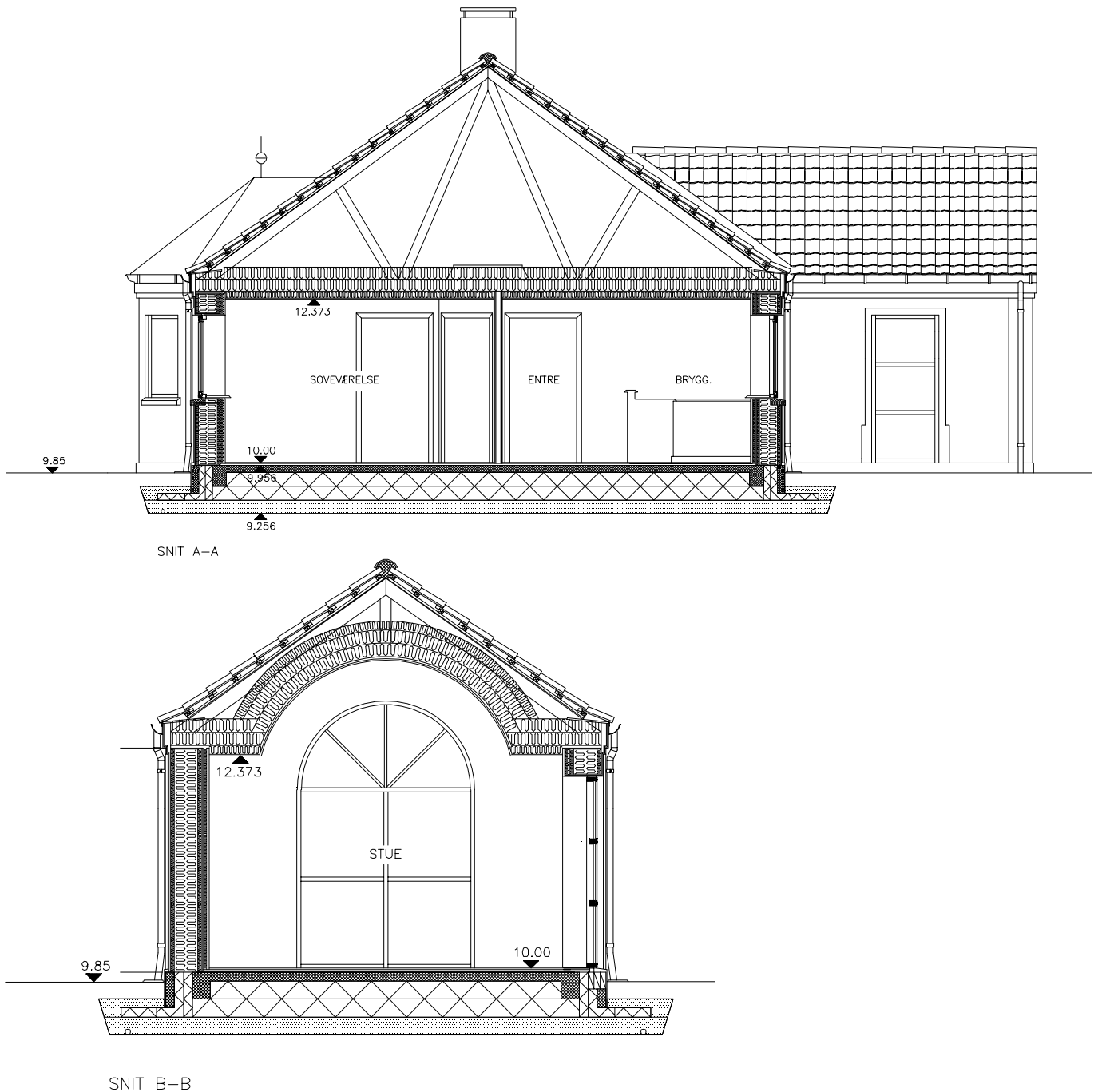
150 mm mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) mellem spærfodder.

200 mm ubrudt mineraluld ($\lambda=0,039$ W/mK) over spærfodder.

Ventileret tagrum og tagsten på lægter med vindtæt undertag ($R=0,300$ m²K/W). Tagrummet ventileres via kippen samt ventiler ved tagfod ud for hvert andet spærfag.

Alt træ forudsættes at være almindeligt konstruktionstræ med en densitet på 450 kg/m³.

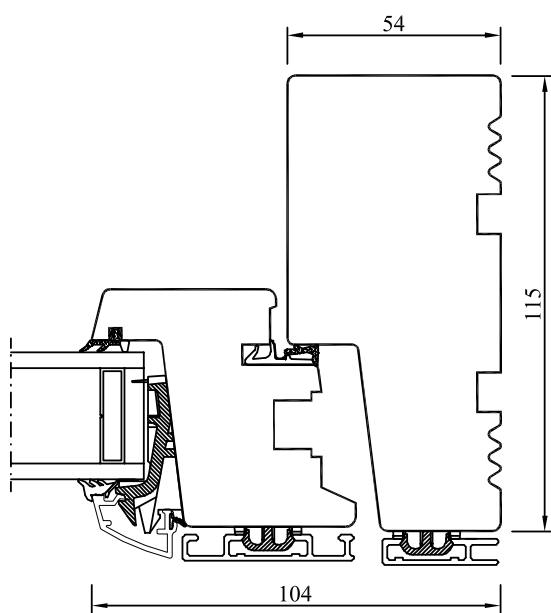
I stuen er en del af loftkonstruktionen buet. Denne del (inkl. de vandrette dele på begge sider af den buede del) har 100 mm mindre isolering end loftet i resten af huset, se figur 16.



Figur 16. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Tværsnitstegninger.

3.2.7 Vinduer og døre

Vinduer og døre er kombineret træ/aluminium (type Rational Aldus), hvor karm og ramme er udført i træ og beklædt udvendig med aluminium. Der er anvendt energiruder af typen Silverstar Deluxe fra GK-Glas, der har en U-værdi på $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en total solenergitransmittans på 52 %. I rudekanten er anvendt et afstandsprofil af aluminium. I figur 17 er vist et typisk snit i vinduernes ramme-/karmprofil.



Figur 17. Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet. Typisk snit i ramme-/karmprofil for vinduer.

3.3 Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet



Figur 18. Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet. Opført i Hillerød.

Hustype: Fritliggende enfamiliehus i 2 plan – 153 m²

Byggesystem: Lette ydervægselementer i træskelet

Byggefirma: Danhaus

Husets stueetage består af en stor vinkelstue, køkken, bryggers, WC og entré mens 1. salen består af soveværelse, 2 værelser, bad, depotrum og gang. I bilag 1 – bilag 5 er vist plantegninger af stueetage og 1. sal, facader, lodret snit gennem huset samt en beliggenhedsplan. Det viste snit i huset, giver en idé om samlingsdetaljernes opbygning.

3.3.1 Terrændæk

Konstruktionen består nedefra af 200 mm komprimeret afrettet sand, 200 mm armeret betonplade, 225 mm ekspanderet polystyren, 100 mm betonklaplag med gulvvarmeslanger og armeringsnet og 15 mm gulvbelægning/klinker. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.3.2 Fundament

Fundamentet er opbygget (ovenfra – ned) af 2 stk. 150 x 200 mm Lecablokke med 50 mm isolering imellem, herunder 2 stk. tilpassede 150 x 125 mm Lecablokke med 50 mm isolering imellem. Den resterende del af fundamentet er beton. Mellem betondækket og øverste indvendige Lecablok er påforet 10 mm isolering som kuldebroafbrydelse.

3.3.3 Ydervæg

Ydervæggen består som basis af et træskelet med 145 mm + 75 mm isolering. Indvendig er der afsluttet med 15 mm fibergipspladebeklædning. Dampspærren er beliggende umiddelbart bag fibergipspladerne. Udvendigt er afsluttet med et 50 mm ventileret hulrum og en 110 mm skalmur.

3.3.4 Skunkvæg

Skunkvæggen består, regnet indefra, af 10 mm fibergipsplade, 50 mm mineraluld mellem 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm mineraluld mellem 50 x 220 mm spærhoved og udvendigt er afsluttet med 12 mm asfaltimprægneret byggeplade.

3.3.5 Skråvæg

Skråvæggen består, regnet indefra, af 10 mm fibergipsplade, 50 mm mineraluld mellem 24 x 48 mm + 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm mineraluld mellem 50 x 220 mm skunkstolper og udvendigt er afsluttet med 12 mm asfaltimprægneret byggeplade.

3.3.6 Indervæg

Indvendige skille vægge består af 15 mm fibergipsplade, 65 mm mineraluld mellem 45 x 70 mm stolper og 15 mm fibergipsplade.

3.3.7 Bjælkelag (etageadskillelse)

Bjælkelaget er opbygget, regnet nedefra, af 10 mm fibergipsplade, 24 x 100 mm forskalling, 100 mm mineraluld mellem 45/50 x 200 mm mellembjælker og 22 mm spånplader.

3.3.8 Loft-/tagkonstruktion, hanebåndsloft (hældning 40°)

Konstruktion består, regnet nedefra, af 10 mm fibergipsplade fastgjort til 24 x 48 mm + 38 x 56 mm forskalling, dampspærre, 200 mm isolering mellem 50 x 200 mm hanebånd, 100 mm ubrudt mineraluld over hanebånd, undertag, 38 x 56 mm lægter og betontagsten.

Alt træ forudsættes at være konstruktionstræ med en densitet på 450 kg/m³.

3.3.9 Vinduer og døre

Vinduer og døre er af træ (type Vrøgum AD-vinduer og ID-døre). Der er anvendt energiruder af typen Silverstar Neutral fra Euroglas, der har en U-værdi på 1,10 W/m²K og en total solenergitransmittans på 63 %.

3.3.10 Lufttæthed

Som tidligere omtalt har BYG.DTU ikke deltaget i forbindelse med projekteringen af hus C, og har således ikke haft mulighed for at påvirke processen mht. husets lufttæthed. Huset er naturligt ventileret, og lufttætheden er derfor ikke lige så vigtig som når der er tale om mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Målinger har da også vist at der er utætheder i klimaskærmen (mere herom i afsnittet om målinger). Dette er ikke overraskende ifølge byggefirmaet, der oplyser at der ikke fokuseres på at gøre klimaskærmen tæt i naturligt ventilerede huse. Firmaet har erfaring for, at folk uden ventilationsanlæg ikke sørger for den nødvendige ventilation, og er derfor betænkelige ved at gøre huset meget tæt. Der er bl.a. ikke sørget for en særlig tætning mellem ydervæg og etageadskillelse.

Byggefirmaet leverer også huse med mekanisk ventilation med varmegenvinding, og i disse huse udføres samlinger mv. omhyggeligt, så husene opnår en høj grad af lufttæthed. Lufttætheden eftervises i hvert enkelt tilfælde med trykprøvning efter tysk DIN-standard.

3.4 Hus D. Fuldmuret



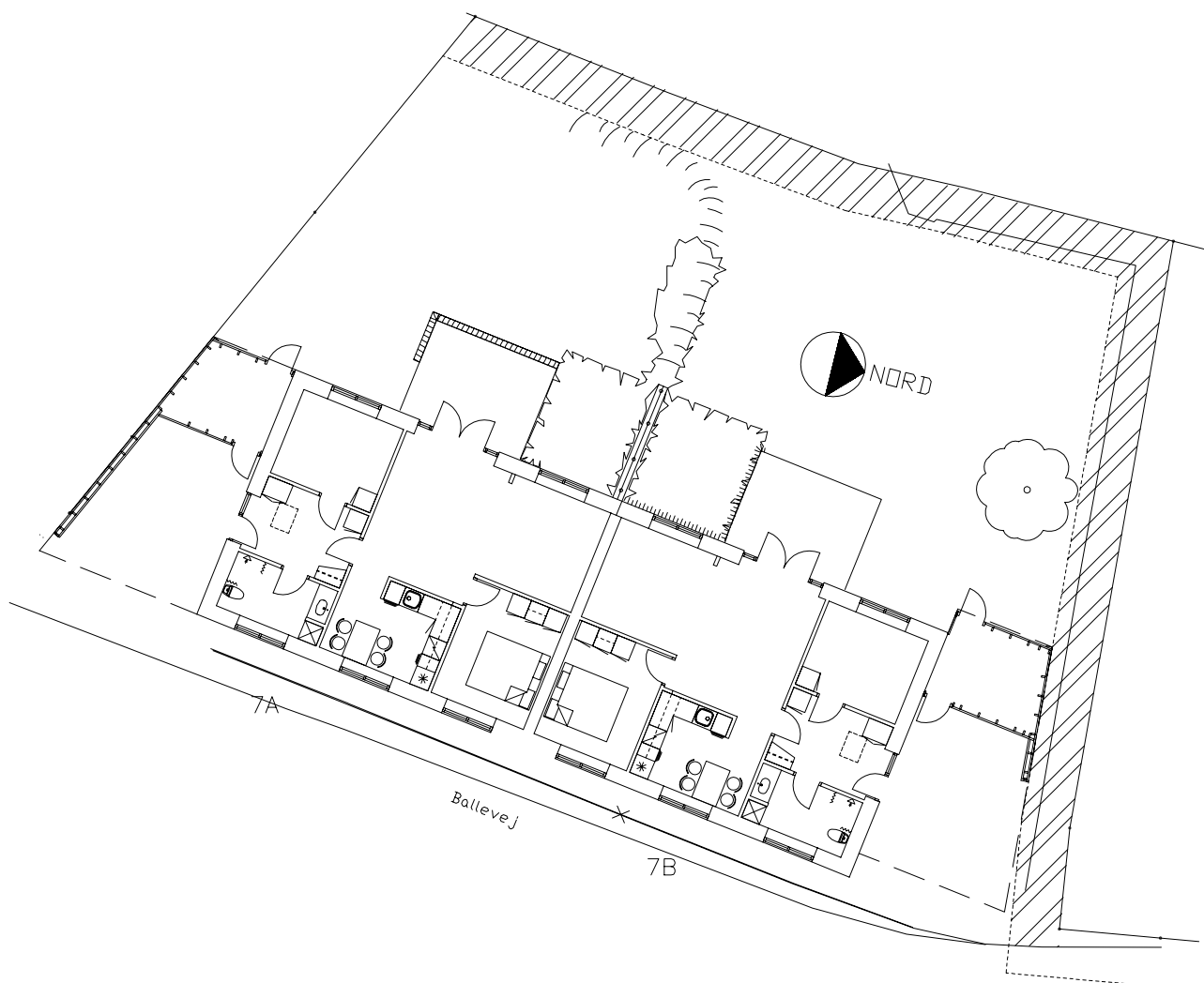
Figur 19. Hus D. Fuldmuret. Opført i Thyholm. Billedet er fra rejsegildet.

Hustype: Fritliggende dobbelthus i ét plan – 88 m² (én bolig)

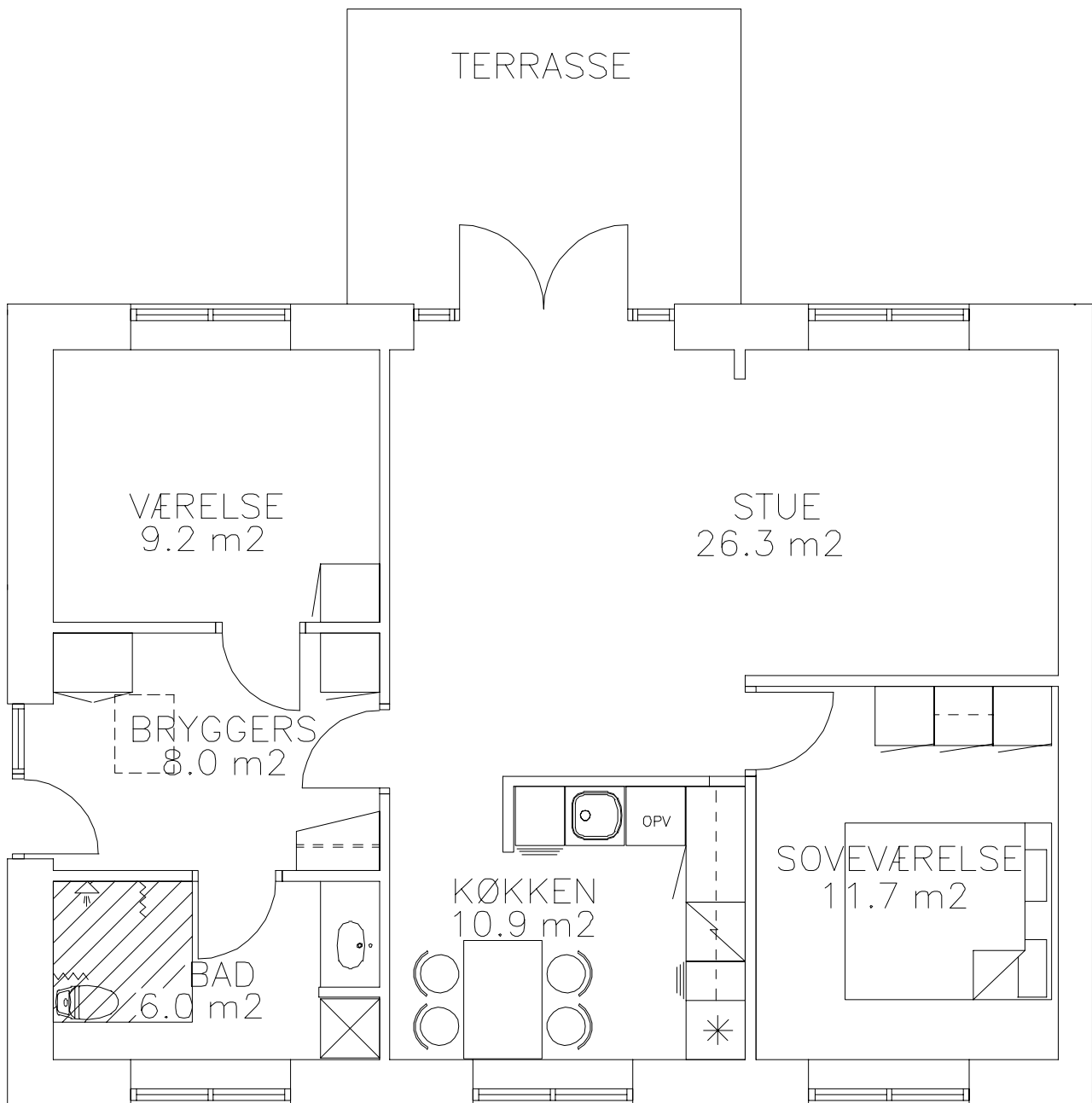
Byggesystem: Fuldmuret

Byggefirma: Thyholm Murer (hovedentreprenør)

Huset består af stue, køkken, bryggers, bad, værelse og soveværelse. I figur 20a – 20c er vist beliggenhedsplan, grundplan og facader for huset.



Figur 20a. Hus D. Fuldmuret. Beliggenhedsplan.



Figur 20b. Hus D. Fuldmuret. Plantegning.



Figur 20c. Hus D. Fuldmuret. Facader. Øverst til venstre vest, øverst til højre syd, nederst til venstre øst, nederst til højre nord.

3.4.1 Terrændæk

Terrændækket består nedefra af følgende:

75 mm lag af kapillarbrydende grus.

2x125 mm isolering, terrænbatts industri.

120 mm armeret terrændæk af beton.

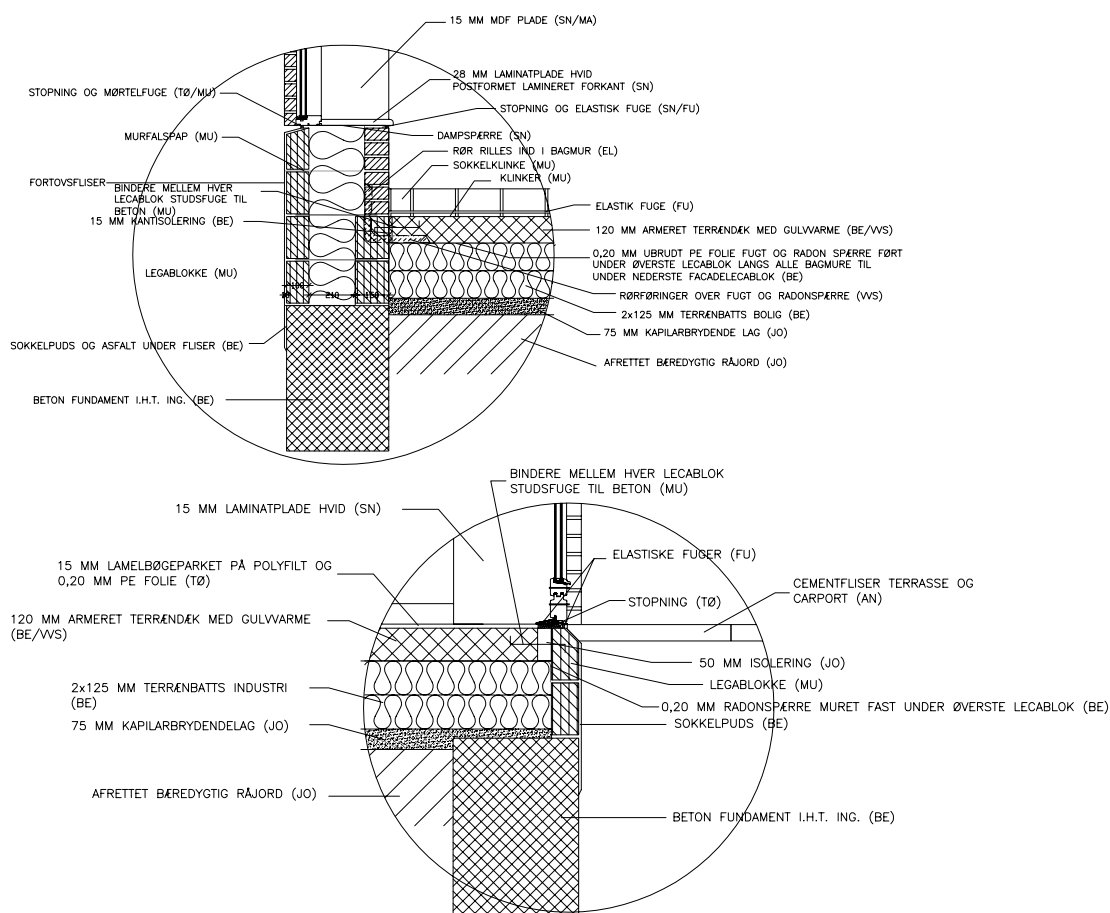
Fugt- og radon spærre.

Gulvbelægning.

På grund af den store isoleringstykkelse anvendes der terrænbatts industri med høj styrke/stivhed i stedet for de typiske terrænbatts bolig. Gulvbelægningen i stue, værelser og køkken består af 15 mm parketgulv (olieret bøg) på polyfilt membran. I bad og bryggers er der klinkebelægning. Der er gulvvarme i hele huset og det antages at gulvvarmeslangerne er placeret i forbindelse med dækarmeringen i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.4.2 Fundament

Isoleringstykkelsen i væggen er ført videre ned i fundamentet. Terrændækket er adskilt fra fundamentet med en 15 mm polystyren over alt på nær ved døre, hvor der er anvendt 50 mm polystyren, for at skabe en effektiv afbrydelse af kuldebroen. Grunden til at det er nødvendigt at anvende tykkere kuldebroisolering ved dørene er, at man her støber terrændækket helt ud til den yderste fundamentsvange. I figur 21 er vist fundamentsdetaljer ved ydervæg og dør.



Figur 21. Hus D. Fuldmuret. Fundamentsdetaljer ved tilslutning til ydervæg og dørparti.

3.4.3 Ydervæg

Ydervægskonstruktionen består af en 470 mm hulmur af teglsten. Konstruktionen er bygget op af:

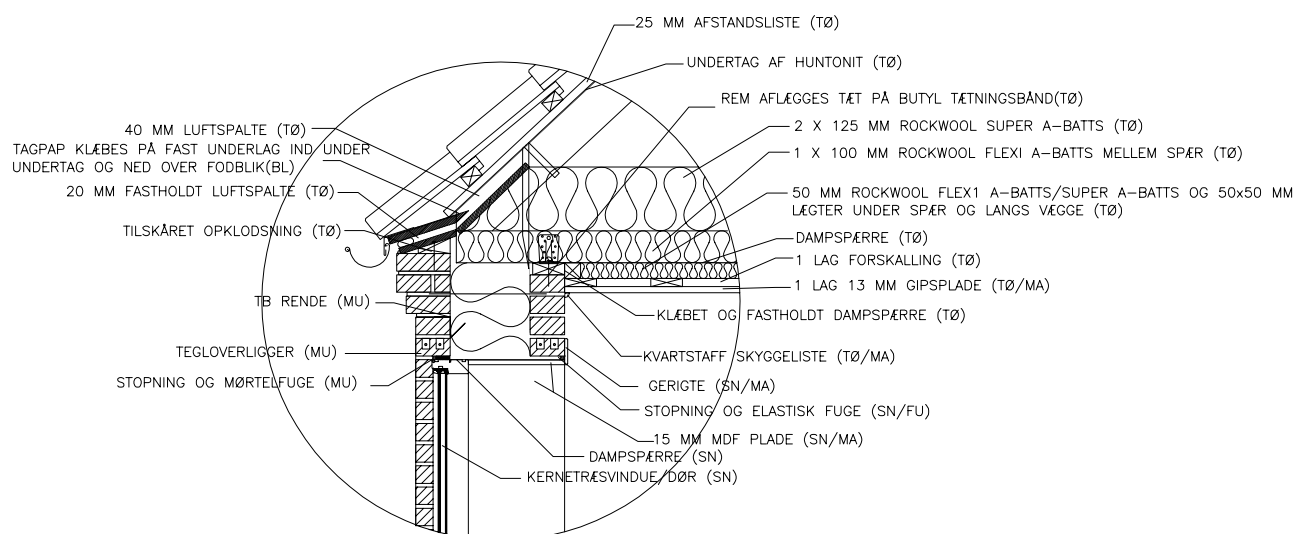
- 108 mm massiv teglsten udvendig.
- 250 mm isolering, Super A-murbatts.
- 108 mm massiv teglsten indvendig.

Isoleringen er udført i 2 lag á 125 mm med forskudte lodrette samlinger. Isoleringen er fastholdt til plan bagmur. Der er ikke ommuringer ved vindues- og dørfalse. Bagmuren er opmuret (netop fyldte fuger) med teglsten der filtses og males.

Formur og bagmur er forbundet med rustfri S-bindere i hvert 4. skifte. Der er foretaget en vurdering af fordele og ulemper ved brug af hhv. plastbindere og bindere i rustfrit stål i en fuldmuret ydervæg med 250 mm isolering. Den overordnede konklusion er at det ikke er fordelagtigt at anvende plastbindere, bl.a. pga. en merpris på 70 % i forhold til rustfri bindere. Den nævnte vurdering er at finde i den detaljerede rapport på huset [11].

3.4.4 Vinduestilslutninger

I figur 22 er vist lodrette snit i overfals. Sidefalsen og underfalsen er opbygget som overfalsen. Af figuren er det tydeligt at isoleringstykkelsen i ydervæggen ikke reduceres omkring vindue/dør. Glasset er trukket ca. 80 mm tilbage i forhold til ydervæggens udvendige side.



Figur 22. Hus D. Fuldmuret. Lodret snit i overfals.

3.4.5 Indervæg

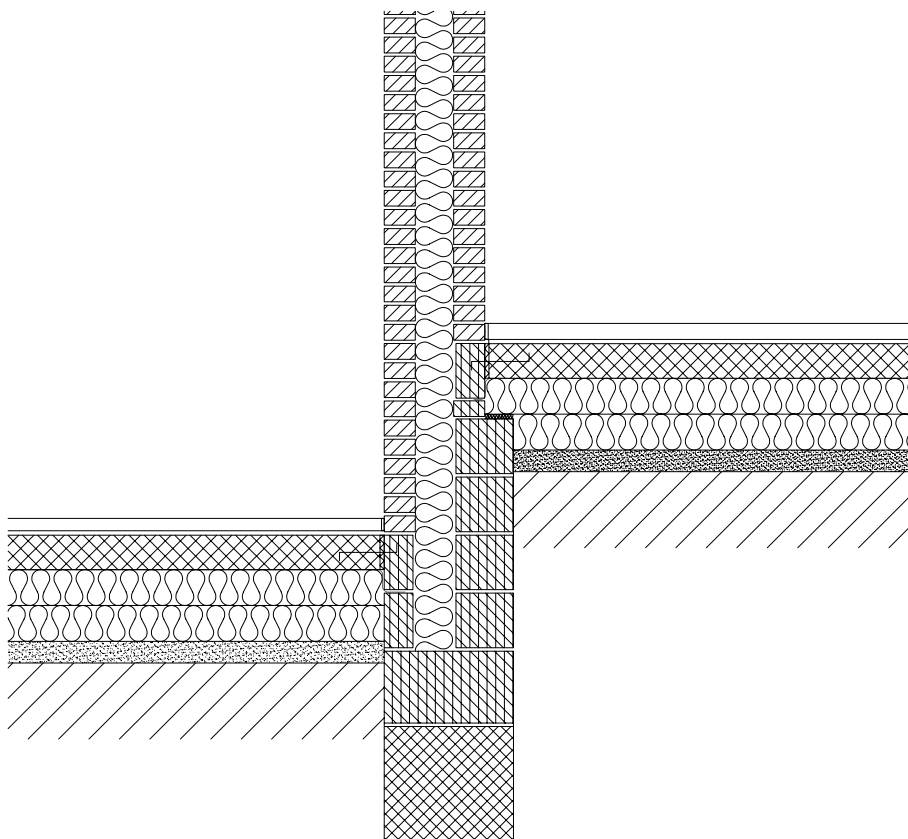
Alle indervægge mures op af 108 mm massiv teglsten og vandskures.

3.4.6 Lejlighedsskel

Væggen der adskiller de to boliger, er en 330 mm hulmur af teglsten. Konstruktionen består af:

- 108 mm massiv teglsten indvendig.
- 125 mm isolering, A-murbatts.
- 108 mm massiv teglsten indvendig.

Isoleringstykkelser i væggen er ført videre ned i fundamentet. I figur 23 er vist et lodret snit i lejlighedsskellet.



Figur 23. Hus D. Fuldmuret. Lodret snit i lejlighedsskel.

3.4.7 Loft-/tagkonstruktion

Loft- og tagkonstruktion består af følgende:

13 mm gipsplade (900 kg/m^3).

22 x 100 mm forskalling.

50 x 50 mm lægter under spærfodder pr. 900 mm og 50 mm Flexi A-Batts imellem lægter.

Dampspærre.

100 mm Flexi A-Batts mellem spærfodder (95 x 50 mm).

1 x 100 mm ubrudte Super A-Batts over spærfodder.

1 x 150 mm ubrudte Super A-Batts over spærfodder.

Det er forudsat at alt træ er almindeligt konstruktionstræ med densitet på 450 kg/m^3 .

3.4.8 Vinduer og døre

Vinduerne i huset er alle lige store og af samme type. Der er to døre i huset; en terrassedør i stuen, og en hoveddør i entreen. Vinduer og døre er Kernevinduet fra Ravn Vinduer og Døre A/S. Der er anvendt almindelige 2-lags energiruder med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en solenergitransmittans på 0,63. Rudekanten er udført med et ikke-metallisk afstandsprofil svarende til type Thermix fra Glas Plus.

3.4.9 Lufttæthed

For hus D udgør væggen filtsning og maling lufttætheden og fugtspærren. Dampspærren i loftskonstruktionen er placeret over hhv. 22 mm forskalling samt 50 mm lægter og mineraluld. Herved opnås igen mulighed for at føre elinstallationer uden at dampspærren skal perforeres. Ved vinduer og døre er der indlagt dampspærre i lysningerne. Ved samlingen mellem ydervæg og loftskonstruktion klæbes og fastholdes dampspærren ved remmen.

3.5 Hus E. Skalmurede porebetonelementer



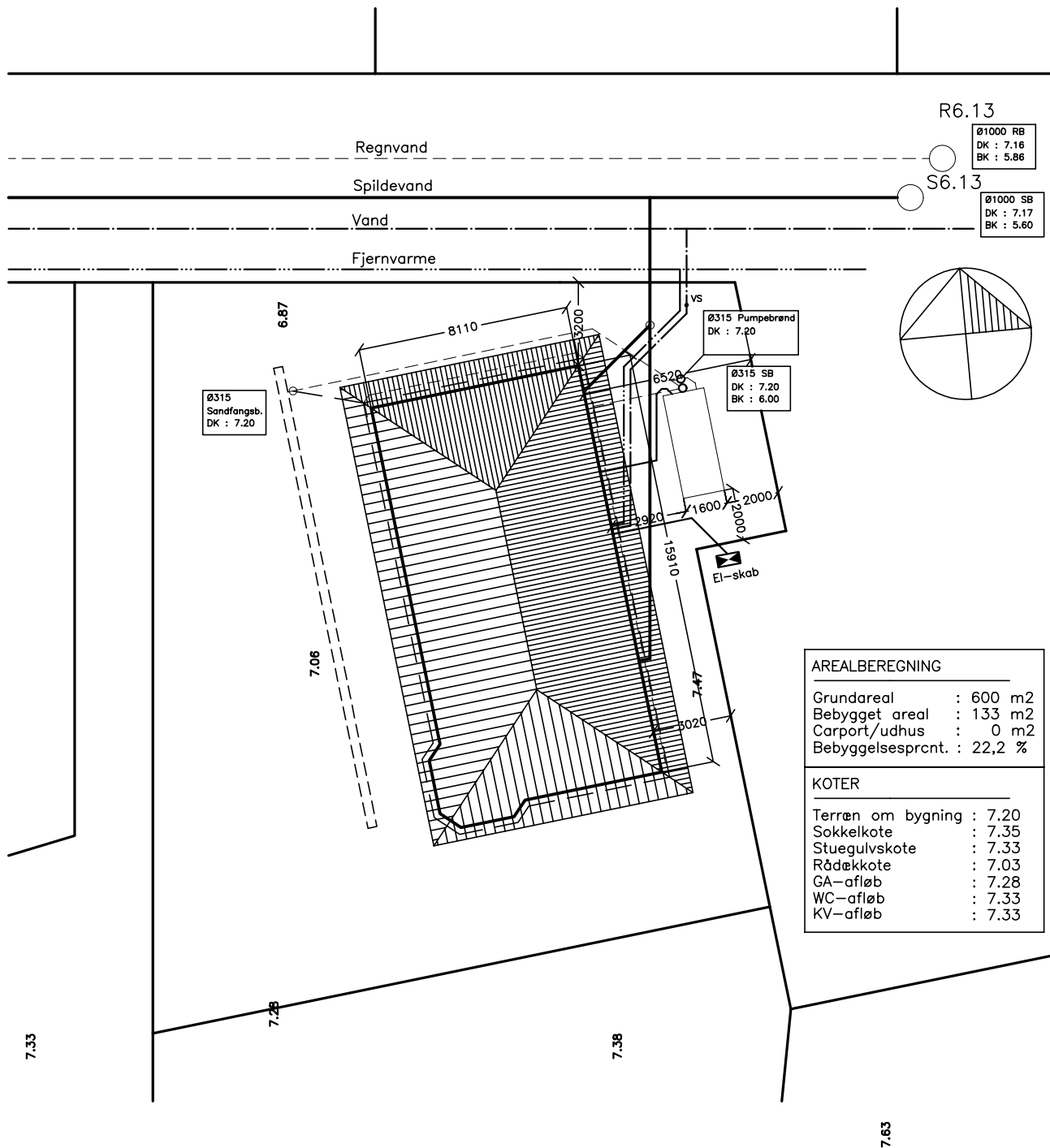
Figur 24. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Opført i Brøndby Strand.

Hustype: Fritliggende længehus med valmhus-arkitektur – 133 m²

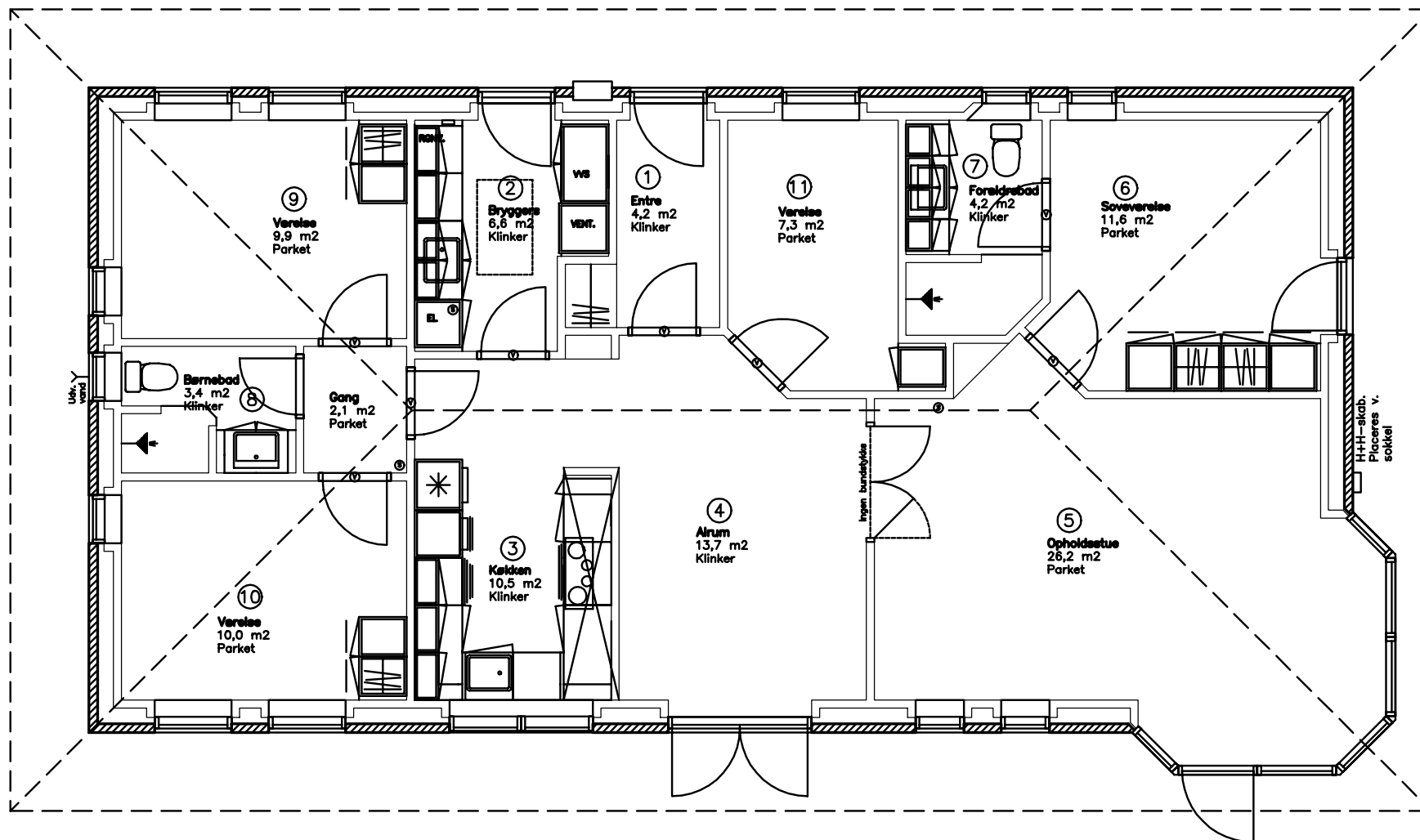
Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer

Byggefirma: Bülow & Nielsen

Huset består af en stor stue og køkken/alrum, tre værelser, bryggers, entré og to baderum/WC. I figur 25a – 25c er vist en beliggenhedsplan, plantegning og facader.



Figur 25a. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Beliggenhedsplan.



Figur 25b. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Plantegning.



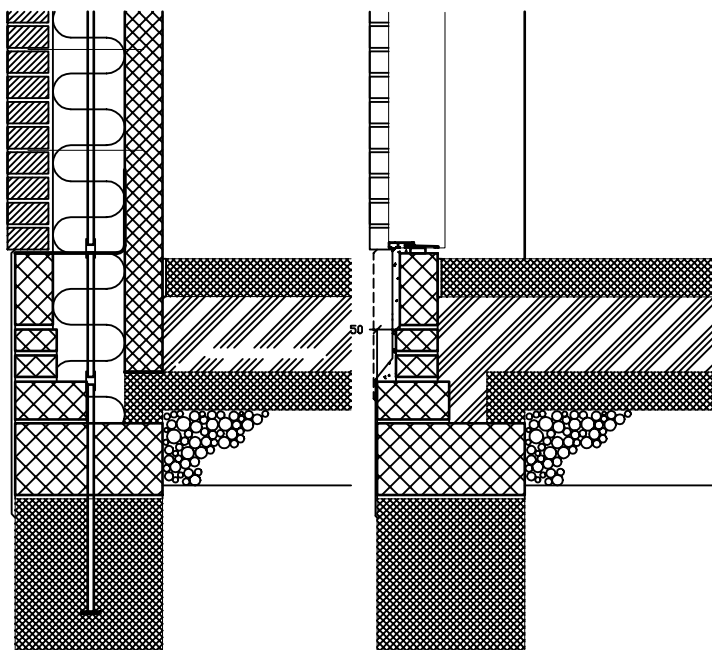
Figur 25c. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Facader.

3.5.1 Terrændæk

Konstruktionen består nedefra af 200 mm singels, 100 mm beton rådæk, 225 mm ekspanderet polystyren, 100 mm betondæk med gulvvarmeslanger og armeringsnet samt gulvbelægning i form af 14 mm parket, undtagen i baderum, køkken, entre og bryggers, som er klinkebelagt. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.5.2 Fundament

Fundamentet er opbygget af letklinkerblokke, og ydervæggens isolering føres ned i fundamentet i fuld tykkelse indtil nederste betondæk, se figur 26. Ud for nederste betondæk er isoleringstykkelsen reduceret til ca. 100 mm. Ved døre-/glaspartier er der benyttet 20 mm kuldebroisolering mellem dækkonstruktionen og lecablok.



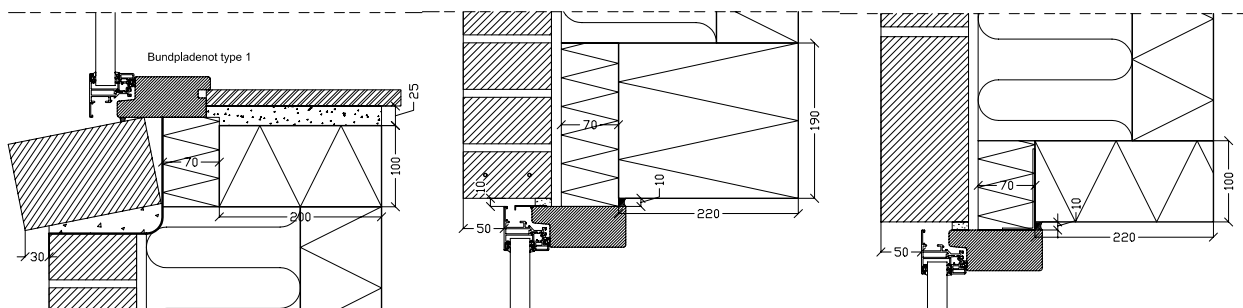
Figur 26. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Sokkeldetaljer ved ydervæg og døre/høje vinduespartier.

3.5.3 Ydervæg

Konstruktionen består af en 400 mm hulmur af teglsten og letbeton. Formuren består af 110 mm teglsten og bagmuren af 100 mm porebetonelementer, som er forbundet med 6 stk. trådbindere pr. m² af 3 mm rustfast stål. Muren er isoleret med 190 mm mineraluld udført som to lag af hhv. 100 mm og 90 mm. De to lag er anbragt med forskudte samlinger.

3.5.4 Vinduestilslutninger

Ved vinduer og døres lodrette sider er af styrke- og afdækningsmæssige hensyn udført falselementer, og ved vinduers underfals er udført falselement og muret rulleskifte. Over de smallere vinduer og døre er anbragt 190 x 220 mm armeret letbetonbjælke og over døren i køkken/alrum samt vinduerne i glasfacaden er anbragt en 190 x 100 mm betonbjælke. Kuldebroisoleringen er overalt 70 mm. Snittegninger er vist i figur 27.



Snit i bundkarm 1:5

Snit i overkarm 1:5

Snit i sidekarm 1:5

Figur 27. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Vinduestilslutninger. Ej målfaste.

3.5.5 Indervæg

Alle indervægge er udført af 100 mm porebetonelementer.

3.5.6 Loft-/tagkonstruktion

Konstruktion består nedefra af:

2 x 13 mm gipsplader.

19 x 100 mm spredt forskalling pr. 300 mm.

50 mm mineraluld med 50 x 50 mm forskalling pr. 1000 mm

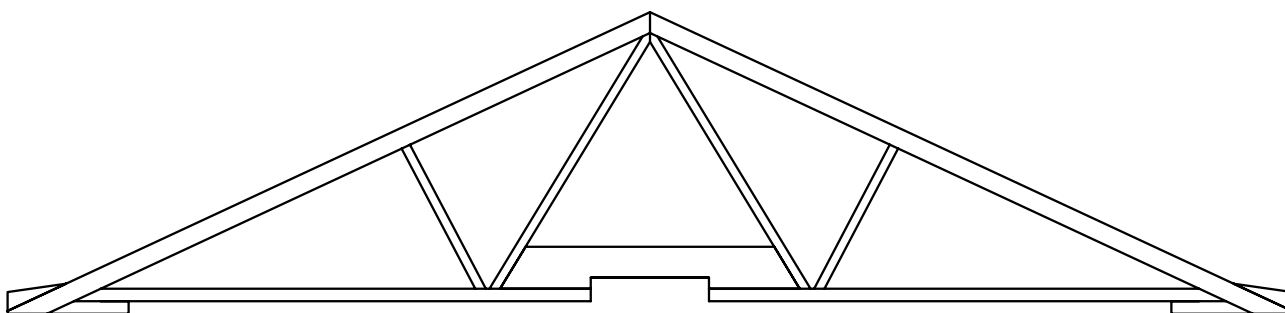
Dampspærre (plastfolie 0,15 mm) er placeret beskyttet mellem forskalling og spærfod.

150 mm mineraluld mellem spærfødder.

150 mm ubrudt mineraluld i to lag over spærfødder.

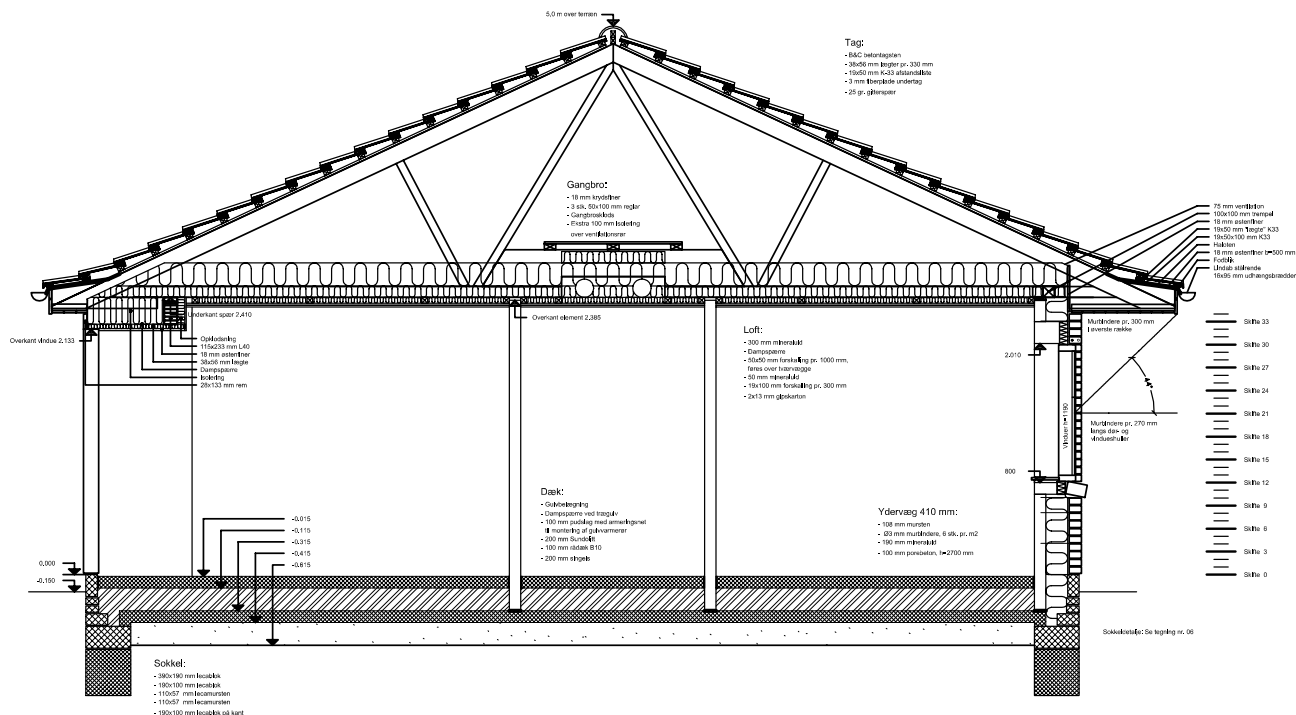
Ventileret tagrum og tagsten på lægter med vindtæt undertag.

Der er anvendt en atypisk spærfodsløsning, idet denne er forskudt, så der er skabt plads til at fremføre ventilationskanalerne i den nederste del af loftkonstruktionen, se figur 28. Derved reduceres kanalvarmetabet til et minimum.



Spær 1:50

Figur 28. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Spærløsning. Udvekslingen i spærfoden muliggør fremføring af ventilationskanaler i den nederste del af loftkonstruktionen, hvorved varmetabet minimeres. Tegningen er ikke målfast.



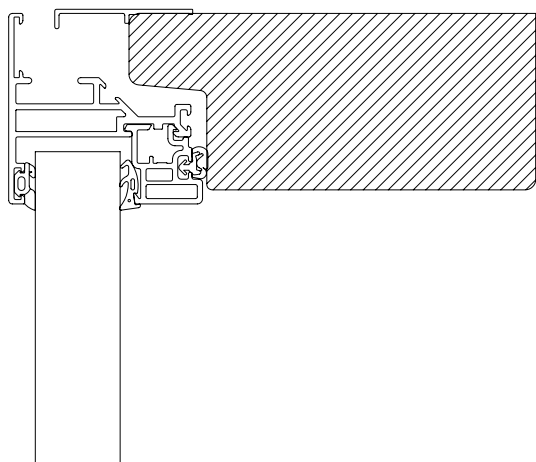
Normalsnit 1:20

Figur 29. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Tværsnit. Tegningen er ikke målfast.

3.5.7 Vinduer og døre

Vinduer og døre er af typen Velfac 200 og er opbygget med trækarm og aluminiumsramme. Ramme-karm profilet har en tykkelse på 120 mm, hvilket giver mulighed for den relativt store kuldebroisolering ved tilslutninger til ydervæg. Ramme-/karmprofilet har U-værdien 2,78 W/m²K, hvilket er relativt højt, men til gengæld er ramme-/karmprofilet meget smalt hvilket medfører at der opnås en stor glasprocent for vinduer og døre. I figur 30 er vist et typisk snit i ramme-/karmprofilet.

Der er anvendt lavenergi ruder, bestående af 4 mm glas, 15 mm 90/10 Argon/luft fyldning og 4 mm glas med en U-værdi på 1,10 W/m²K og en total solenergitransmittans på 59 %. I rudekanten er der anvendt et aluminiumsprofil, hvilket medfører at samlingen mellem rude og ramme har en relativt høj linietafskoefficient (ψ -værdi).



Figur 30. Hus E. Skalmurede porebetonelementer. Typisk snit i ramme-/karmprofil for vinduer.

3.5.8 Lufttæthed

For hus E er tiltagene vedrørende lufttætheden meget lig tiltagene i hus A. Plastfolien i loftskonstruktionen er ved bagvægge ført via rem til yderside af bagvæg, hvor den er klemmt med liste mod gummifuge. Der er ligeledes dobbelt forskalling i loftskonstruktionen, således at dampspærren kan placeres lidt inde i konstruktionen og dermed give plads til udførelse af elinstallationer, se figur 31.



Figur 31. Loftkonstruktion under opførelse. Billedet viser dels at dampspærren er placeret beskyttet, idet den er trukket tykkelsen af to forskallingslag ind i konstruktionen, og dels den rørkrave der sikrer tætheden hvor ventilationskanaler gennembryder dampspærren.

For hus E udgør væggens spartling og maling lufttætheden og dampspærren.

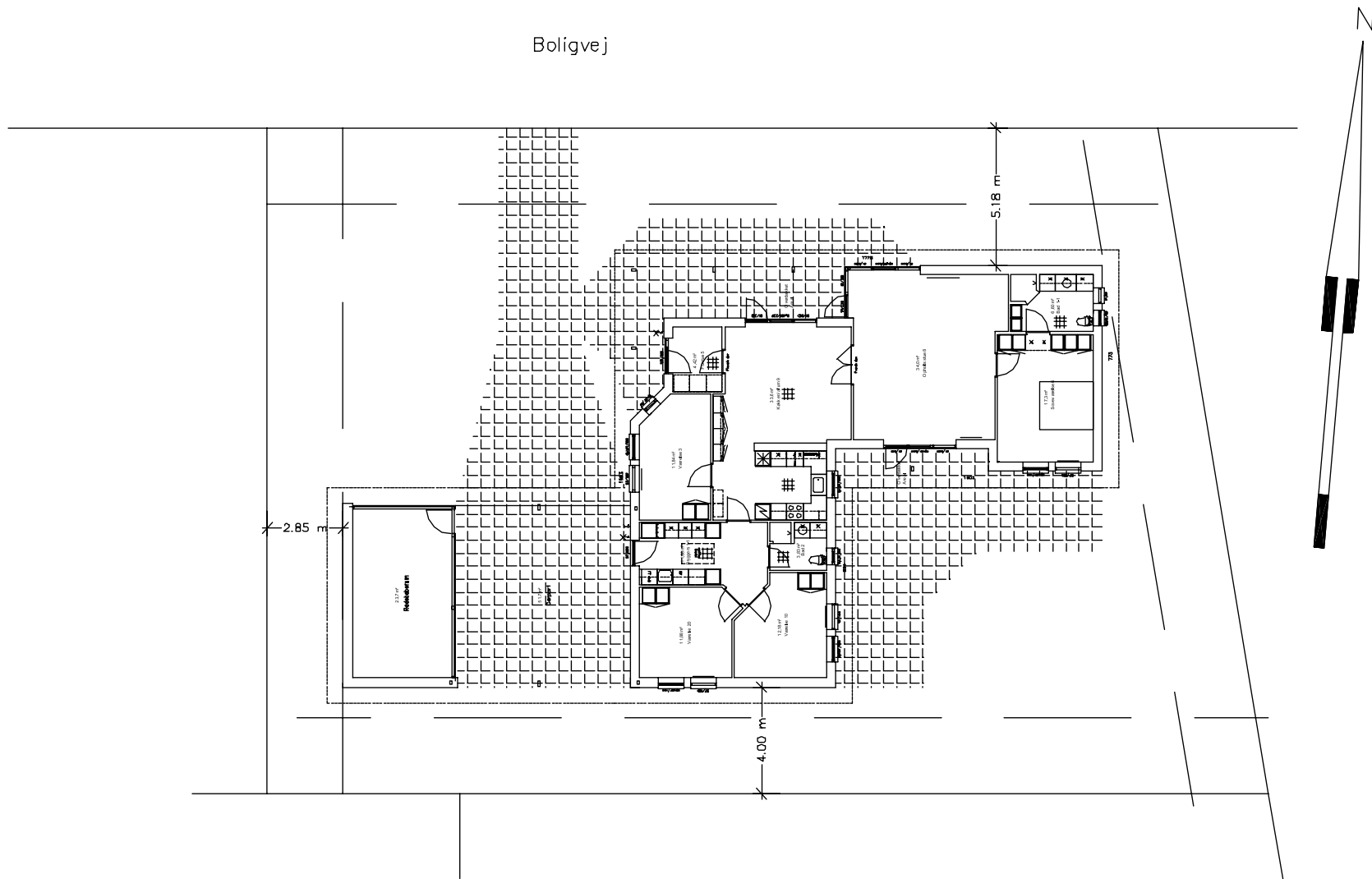
3.6 Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton

Hustype: Fritliggende enfamiliehus – 175 m²

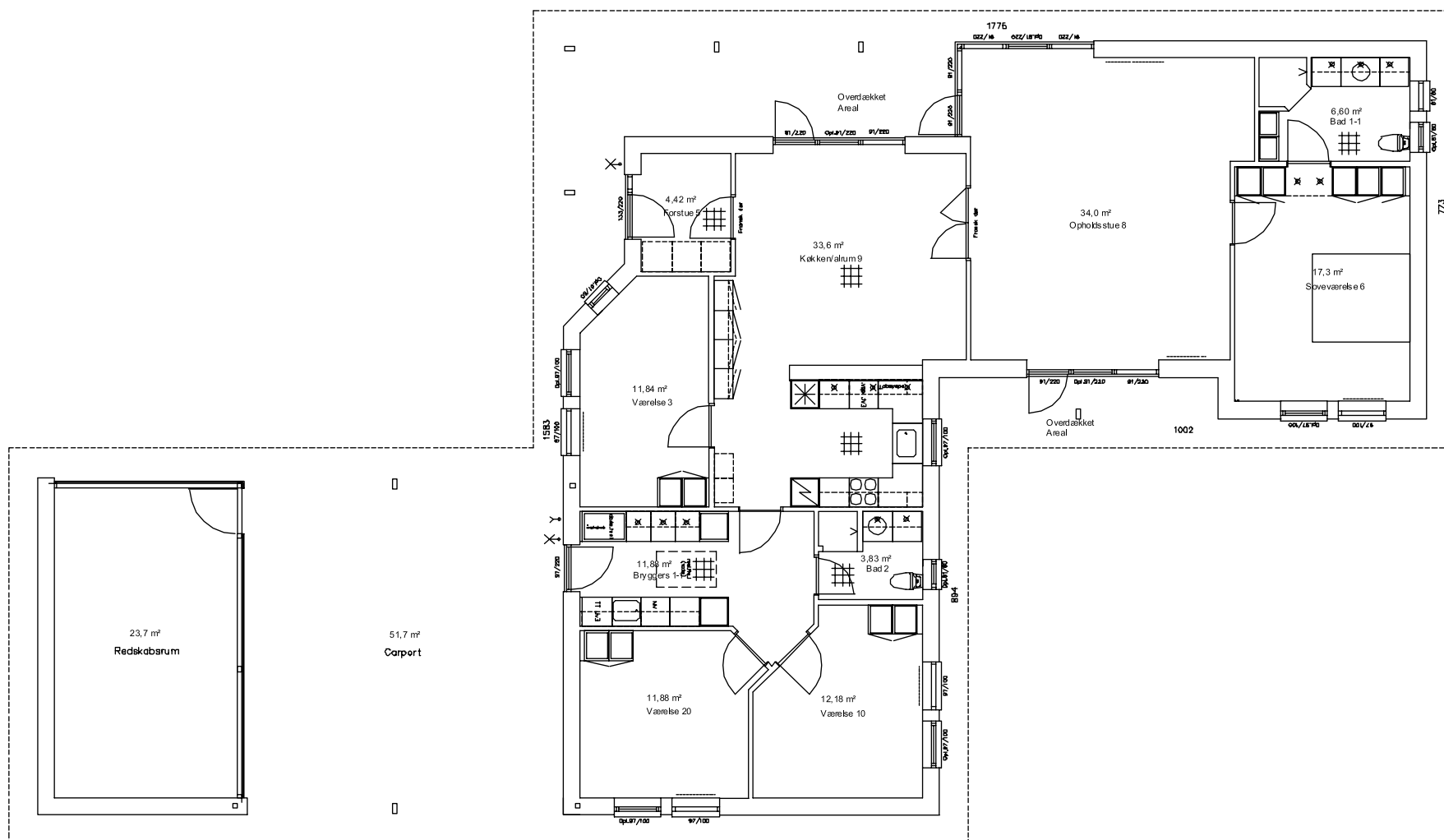
Byggesystem: Helvægselementer i letklinkerbeton

Byggefirma: Eurodan Huse

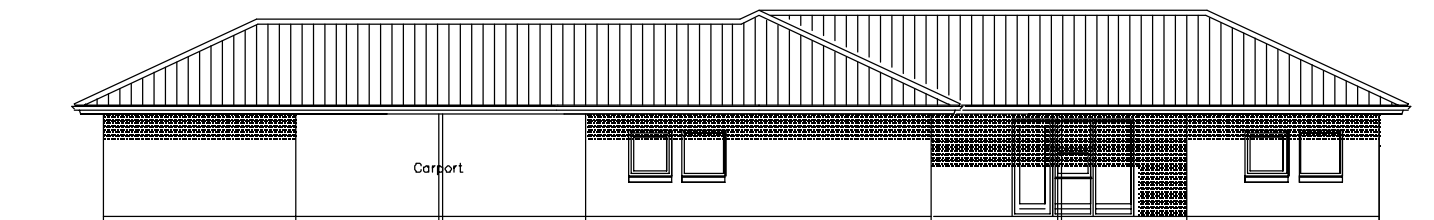
Huset består af en stor opholdsstue og forstue, køkken/alrum, soveværelse, tre værelser, bryggers og to baderum/WC. I figur 32a – 32c er vist en beliggenhedsplan, plantegning og facader.



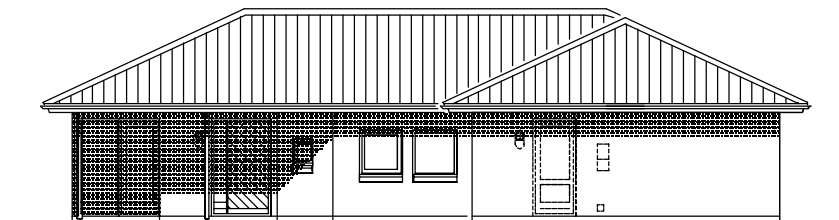
Figur 32a. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Beliggenhedsplan.



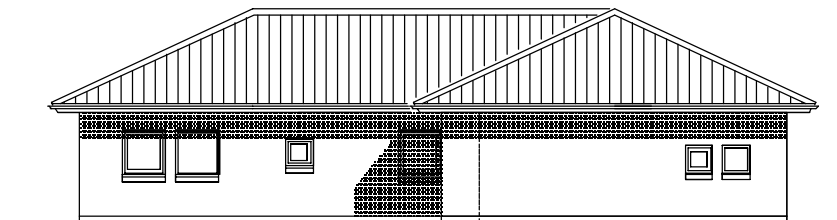
Figur 32b. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Plantegning.



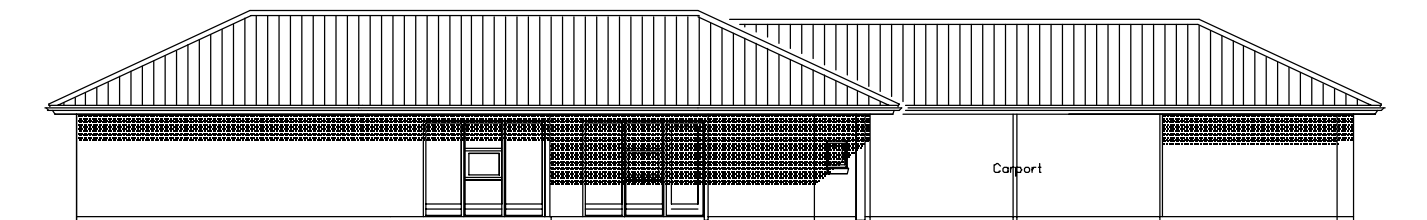
FACADE MOD SYD



FACADE MOD VEST



FACADE MOD ØST



FACADE MOD NORD

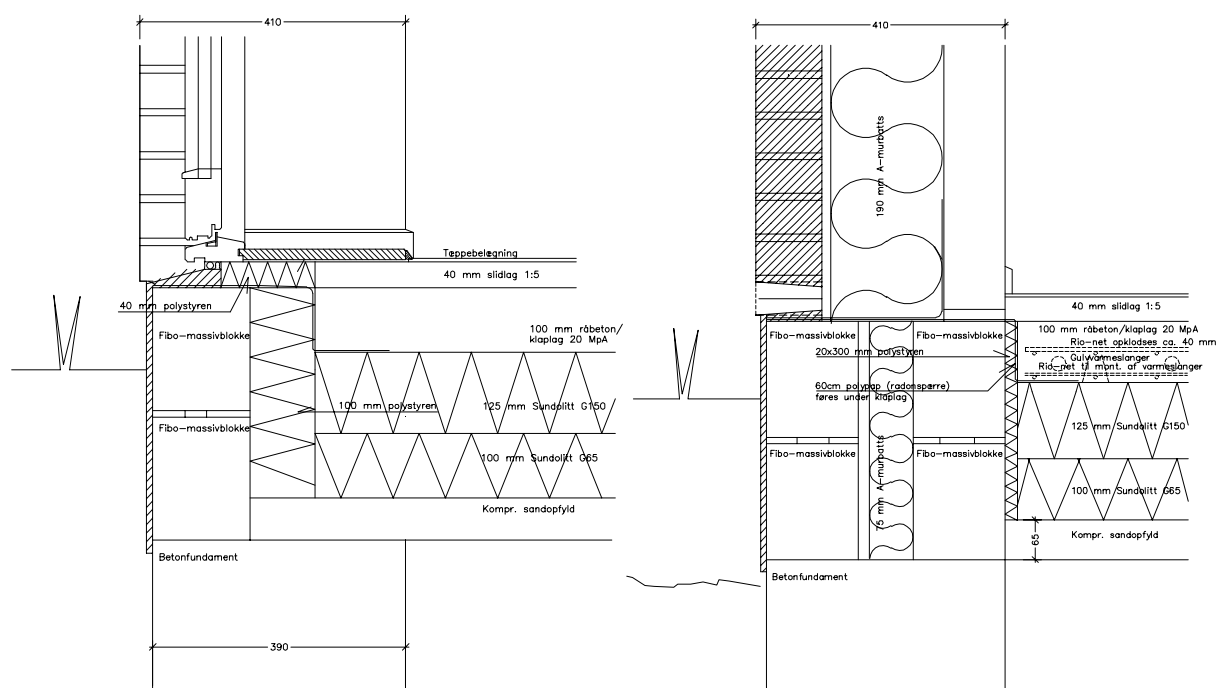
Figur 32c. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Facader.

3.6.1 Terrændæk

Konstruktionen består, regnet nedefra, af 150 mm komprimeret afrettet sand, 225 mm ekspanderet polystyren, 100 mm betondæk med gulvvarmeslanger og armeringsnet. Gulvbelægningen er enten klinkegulve med 35 mm underliggende cementmørtel eller tæpper/vinyl med 40 mm underliggende cementmørtel. Gulvvarmeslangerne er beliggende i den nederste tredjedel af betonlaget.

3.6.2 Fundament

Fundamentet opbygges af to ens skifter blokmurværk med isolering, opbygget af 150 x 190 mm letklinkerblok, 75 mm isolering og 150 x 190 mm letklinkerblok. Ved døre-/glaspartier er der benyttet 100 mm polystyren mellem dækkonstruktionen og letklinkerblok, se figur 33.



Figur 33. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Sokkeldetaljer.

3.6.3 Ydervæg

Konstruktionen består af en 410 mm hulmur af teglsten og letklinkerbeton. Formuren består af 110 mm teglsten og bagmuren af 100 mm letklinkerbetonelementer, som er forbundet med 3 stk. trådbindere pr. m² af 4 mm rustfast stål. Muren er isoleret med 190 mm mineraluld.

3.6.4 Vinduestilslutninger

Vinduer og døre fastgøres til formuren hvilket muliggør at ydervæggens isoleringstykkelse kan føres helt hen til vinduet. Ved vandrette false under vinduer er udført muret rulleskifte. I figur 33 er vist tagfoden, hvor også tilslutningen mellem ydervæg og vindue fremgår.

3.6.5 Indervæg

Alle indervægge er udført af 100 mm letklinkerbeton.

3.6.6 Loft-/tagkonstruktion

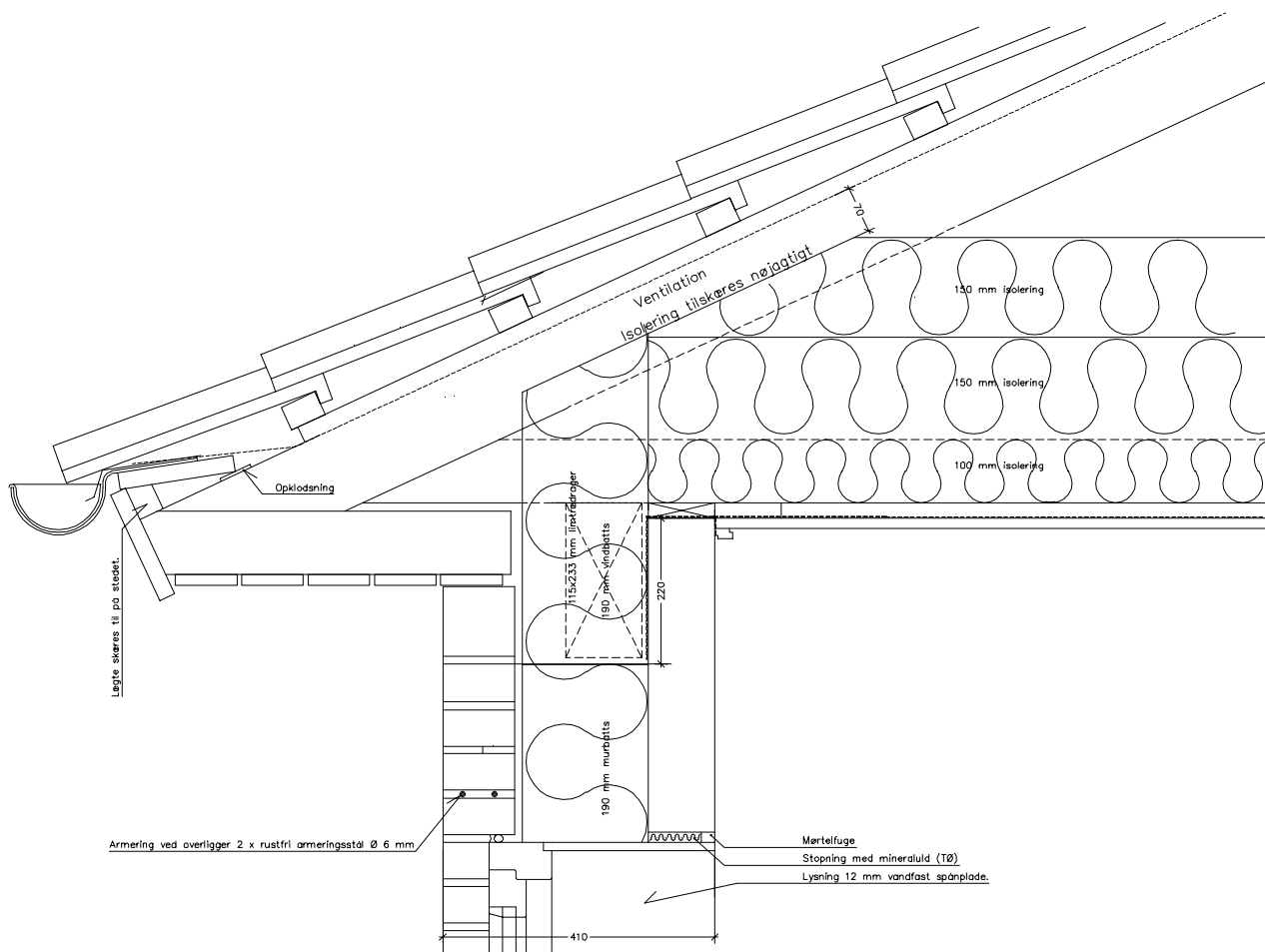
Konstruktion består nedefra af:

16 mm loftsbrædder i fyrretræ.

Dampspærre (plastfolie 0,15 mm).

100 mm mineraluld mellem spærfodder.
2 x 150 mm ubrudt mineraluld over spærfodder med forskudte samlinger.
Ventileret tagrum og betontagsten på lægter med vindtæt undertag.

Ligesom for en del af de øvrige huse beskrevet i rapporten, er der anvendt en spærfodsløsning der muliggør fremføring af ventilationskanalerne i den nederste del af loftkonstruktionen.

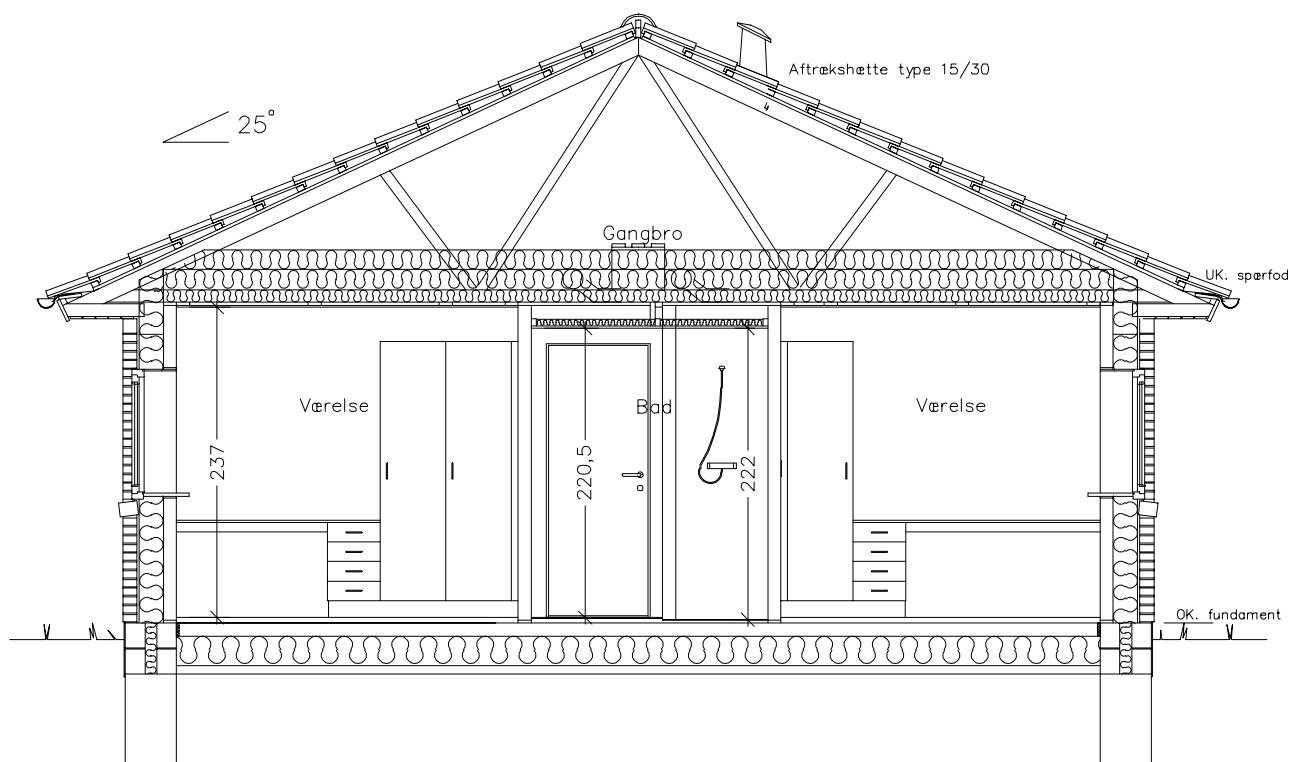


Figur 34. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Tagfod.

3.6.7 Vinduer og døre

Vinduer og døre er med trækarm og -ramme. Ramme-karm profilet har en tykkelse på 92 mm. Kuldebroisoleringen dækkes vha. 12 mm cementspånplade. Ramme-/karmprofilet har en gennemsnitlig U-værdi på 1,50 W/m²K.

Der er anvendt almindelige energiruder (Optitherm Super) bestående af 4 mm glas, 15 mm 90/10 Argon/luft fyldning og 4 mm glas med en U-værdi på 1,13 W/m²K og en total solenergitransmittans på 59 %. I rudekanten er der anvendt et aluminiumsprofil (Bendtech 15), hvilket medfører at samlingen mellem rude og ramme har en relativt høj linietabskoefficient (ψ -værdi). Den gennemsnitlige totale U-værdi for vinduer og døre er beregnet til 1,48 W/m²K.



Figur 35. Hus F. Helvægselementer i letklinkerbeton. Tværsnit.

3.6.8 Lufttæthed

Hus F opføres som nævnt ikke og derfor er det kun i forbindelse med projekteringen at der har været fokuseret på lufttætheden af klimaskærmen. Generelt blev det aftalt at gennemføre samtlige de foranstaltninger som er nævnt i forbindelse med hus A, dvs. at plastfolien ved bagvægge skulle føres via rem til bagkant, hvor den skulle tætnes med liste og gummifuge. Loftskonstruktionen skulle, som det kan ses i figur 34, udføres med dobbelt forskalling, således at dampspærren placeres inde i konstruktionen og dermed giver plads til udførelse af elinstallationer mv. Hvor ventilationskanaler gennembryder dampspærren skulle der tætnes med rørkraver, og dampspærren skal ligges med overlap og samlingerne tætnes med tape.

Ligesom for hus A skulle spartling og maling udgøre lufttætheden og dampspærren for ydervæggen.

4 INSTALLATIONER

Forsøgshusenes tekniske installationer beskrives kort i det følgende.

4.1 Ventilation

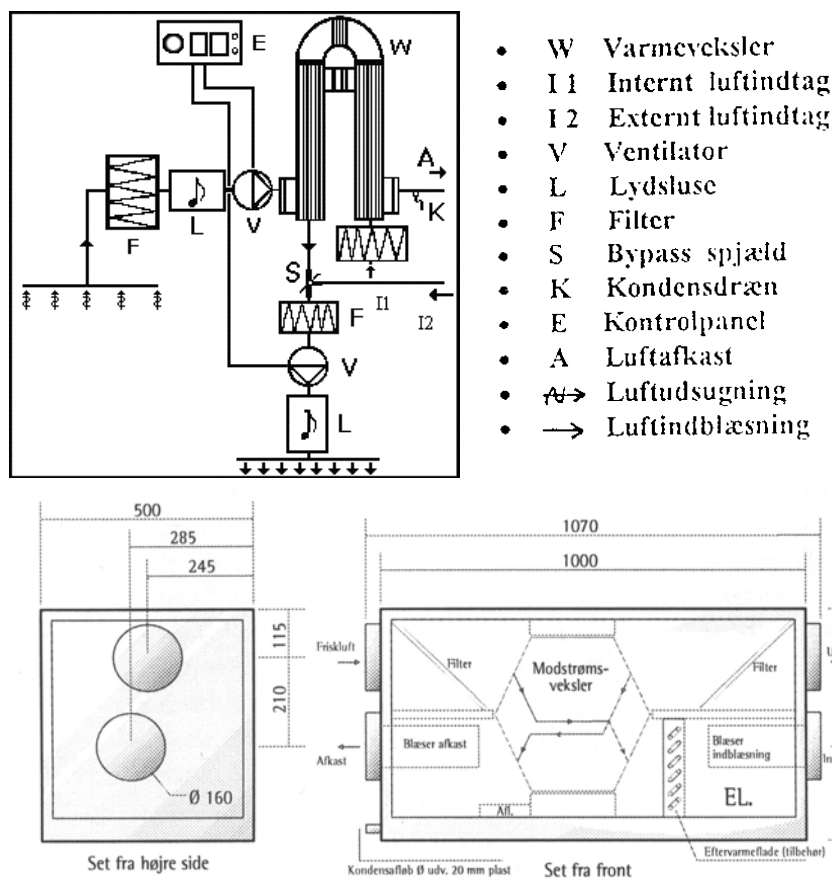
For et typisk enfamiliehus med bryggers, køkken og to baderum, er der ved mekanisk ventilation krav om fjernelse af indeluft svarende til 60 l/s. Forudsat at der benyttes en af markedets bedste varmevekslere (temperaturvirkningsgrad på 90 %), kan beregnes et årligt besparelspotentiale på ca. 6000 kWh. Til sammenligning er varmetabet gennem vinduer/døre (med energiruder) i et typisk middelstort enfamiliehus i størrelsesordenen 4000-5000 kWh/år. Det er altså afgørende for et lavt opvarmningsbehov, at der er genvinding af varmen i ventilationsluften. Den nævnte varmebesparelse er dog forbundet med en investering på ca. 40.000 kr. (inkl. moms), en nødvendig årlig servicering (udskiftning af filtre mm.) samt et elforbrug til primært drift af ventilatorer. I forbindelse med sidstnævnte er det væsentligt at være opmærksom på ventilatorernes elforbrug. Der bør vælges ventilatorer med en høj el-virkningsgrad, idet elforbruget er meget afgørende for totaløkonomien.

Der er i alle forsøgshuse, med undtagelse af hus C, installeret mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding. I hus C er der anvendt et typisk naturligt ventilationssystem med aftrækskanaler og friskluftventiler, men der er dog af komfortmæssige grunde behovstyret mekanisk udsugning fra toilet og baderum. Der er i figur 31 vist en principskitse af de to ventilationsaggregater, der er anvendt.

Ventilationskanalerne bør af hensyn til varmetab og temperaturforhold placeres inden for isoleringslaget i loftet. Dette kan ske ved anvendelse af udvekslinger i spærfoden som vist i figur 36.



Figur 36. Spærløsning der muliggør fremføring af ventilationskanaler i den nederste del af loftskonstruktionen, svarende til den varme side af loftsisoleringen. Herved minimeres varmetabet.



Figur 37. Ventilationsanlæg anvendt i hhv. hus B (øverst) og Hus A, D, E og F (nederst). Det førstnævnte anlæg er beregnet for en placering i loftisoleringen og det andet anlæg (kun aggregatet er vist), er velegnet til en placering i tagrummet. I hus E er anlægget placeret i bryggerset.

Ventilationsaggregatet vist nederst i figur 37 har ca. 30 mm isolering, hvilket reducerer varmetabet til et acceptabelt niveau (ca. 50 kWh på en fyringssæson) ved en placering i tagrummet. Kanalsystemet kan tilkøbes til aggregatet via lydflexslanger, som reducerer støj fra anlægget.

Der er i de fleste installerede ventilationsanlæg i forsøgshusene ikke monteret en eftervarmeplade pga. varmevekslerens høje virkningsgrad, der sikrer en komfortabel indblæsningstemperatur selv i meget kolde perioder. I hus E er der dog, på bygherrens anmodning, installeret eftervarmeplade, men målinger af energiforbruget har vist at denne faktisk aldrig er i drift. Om sommeren, hvor der ikke er behov for varmegenvinding men eventuelt køling, er der mulighed for at føre luften uden om varmeveksleren, så der direkte kan indblæses kølig udeluft. Erfaringerne viser at dette, kombineret med et hensigtsmæssigt vinduesvalg og udformning af tagudhæng, vil være tilstrækkeligt til at overholde komfortkravene i sommerperioden.

4.2 Anlæg for varme og varmt brugsvand

I tabel 6 er vist en oversigt over anlæg til rumopvarmning og produktion af varmt brugsvand for de forskellige forsøgshuse.

Tabel 6. Oversigt over anlæg til rumopvarmning og produktion af varmt brugsvand.

Hus	Varmeforsyning	Varmeanlæg	Varmt brugsvand	Vejrkompensator*
A	Fjernvarme	Gulvvarme	VV-beholder	Nej
B	Fjernvarme	Gulvvarme	Pladeveksler	Nej
C	Naturgas	Gulvvarme/radiator	VV-beholder	Nej
D	Fjernvarme	Gulvvarme	VV-beholder	Ja
E	Fjernvarme	Gulvvarme	VV-beholder	Ja
F	Fjernvarme	Gulvvarme	VV-beholder	Nej

* udetemperatur-afhængig fremløbstemperatur.

Som det fremgår af tabel 6 er der i forsøgshusene anvendt meget tidstypiske anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Specielle tiltag som solvarmeanlæg er ikke overvejet anvendt, da husene er udviklet før bruttoenergi-princippet blev fastlagt som grundlag for Bygningsreglementet.

I gulvvarmeanlæg anvendes typisk en fast fremløbstemperatur i hele fyringssæsonen, der bestemmes på baggrund af det dimensionerende varmetab for det mest kritiske rum. Dette er især uhensigtsmæssigt i den første og sidste del af fyringssæsonen, hvor udetemperaturen langt fra når den dimensionerende temperatur. Ved at variere fremløbstemperaturen efter behovet for tilført varme, kan varmetabet gennem terrændæk og fundament begrænses og overtemperaturproblemer kan mindskes. Det er altid muligt at regulere fremløbstemperaturen manuelt i et moderne gulvvarmesystem, men det er næppe en regulering den almindelige husejer husker at foretage. Derfor vil det være relevant at anvende en automatisk styring af fremløbstemperaturen efter udetemperaturen. En sådan styring er som angivet ovenfor anvendt i to tilfælde (hus D og E). Varmebesparelsen ved brug af en fremløbstemperatur styret efter udetemperaturen vil erfaringsmæssigt være omtrent 5 % i huse med et energiforbrug som i forsøgshusene. I rapporten ”Udformning og styring af energirigtige gulvvarmeanlæg” er dette og andre områder vedrørende energirigtig udformning af gulvvarmeanlæg uddybet.

5 BEREGNEDE ENERGIMÆSSIGE FORHOLD

I dette afsnit gennemgås de beregnede energi- og indeklimamæssige forhold for forsøgshusene. En mere detaljeret beskrivelse af beregningerne kan findes i de 4 rapporter med hovedtitel ”Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner, Del 1: Konstruktioner/systemer” og undertitler afhængigt af hvilket byggesystem der er tale om, se [11], [12], [13] og [14]. For hus E har tilsvarende rapport titlen ”Typehus svarende til BR-2005 – energikrav. Del 1: Optimering af konstruktioner/systemer” [15].

Beregninger af varmetab er gennemført på baggrund af indvendige mål. Dette er en alternativ metode i forhold til metoderne angivet i DS418 6. udgave [16], hvor man i mange tilfælde benytter udvendige mål for at tage højde for en række af de kuldebroer som forekommer i samlingsdetaljerne. For nærværende er medtaget samtlige betydende kuldebroer i beregningerne, og derfor benyttes indvendige mål til fastlæggelse af arealer mv. Effekten af kuldebroer er beregnet vha. de detaljerede numeriske beregningsprogrammer HEAT2 og HEAT3. Beregninger af transmissionskoefficienter for vinduer og yderdøre er foretaget vha. beregningsprogrammet THERM.

Beregninger af energiforbrug og indeklima er foretaget vha. bygnings-simuleringsprogrammerne tsbi3 [17], BSIM 2000 [18] og BSIM 2002 [19] (som er forskellige versioner af samme program).

5.1 Varmetransmissionskoefficienter

I nedenstående tabel er opstillet varmetabskoefficienter for de 6 forsøgshuse. I det omfang at der i de forskellige huse er forskellige opbygninger af konstruktionerne som hører under samme krav, er der fastlagt arealvægtede middelværdier. Til sammenligning er opstillet eksisterende BR-95 krav og forventede BR-2005 krav.

Tabel 7. Varmetransmissionskoefficienter for forsøgshuse

Bygningsdele [U-værdier i W/m ² K]	Hus A	Hus B	Hus C	Hus D	Hus E	Hus F	BR-95	BR- 2005
Ydervæg	0,17	0,11	0,19	0,14	0,20	0,18	0,30/0,20	0,18
Terrændæk m. GV	0,13	0,09	0,14	0,12	0,13	0,13	0,20	0,15
Lofts-/tagkonstruktion	0,09	0,09	0,13	0,09	0,11	0,09	0,15	0,12
Vinduer/yderdøre	1,43	1,50	1,68	1,32	1,63	1,48	1,80	1,50
Konstruktionssamlinger [ψ-værdier i W/mK]								
Ydervægsguldfundament m. GV	0,11	0,10	0,12	0,12	0,08	0,13	0,25	0,15
Vinduestilslutninger	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,00
Tag-/ovenlystilslutninger	-	-	0,07	-	-	-	0,10	0,08

I BR-95 er U-værdikravet til ydervægge forskelligt for hhv. lette og tunge konstruktioner. Hus A, D, E og F har tunge ydervægge mens hus B og C har lette.

Det fremgår af tabel 7, at samtlige huse opfylder de nu gældende U- og ψ-værdi krav specificeret i BR-95. Betragter man varmetransmissionskoefficienterne i forhold til de forventede krav i BR-2005, kan man se at hus A, B, D og F vil kunne leve op til de kommende skærpede krav.

For hus C og E er det primært vinduernes U-værdier der er væsentligt højere end de forventede skærpede krav, og disse ville man uden videre kunne udskifte med f.eks. de bedre vinduer som er benyttet i de tre andre huse. De øvrige varmetransmissionskoefficienter lever stort set op til de skærpede krav, og det vil blot være nødvendigt med en ganske lille forøgelse af isoleringstykkelsen i ydervæggene for begge huse samt loftskonstruktionen i hus C for at leve op til kravene.

Årsagen til at to af husene ikke lever op til de forventede skærpede krav er, at man i projektet har fokuseret på energirammekravet og ikke på opfyldelse af krav til varmetabskoefficienter.

5.2 Varmetabsramme og dimensionerende varmetab

I tabel 8 er opstillet det dimensionerende varmetab samt nu gældende samt forventede fremtidige varmetabsrammer for de 6 forsøgshuse.

Tabel 8. Dimensionerende varmetab og varmetabsrammer for forsøgshusene.

Bygningsdele	Hus A	Hus B	Hus C	Hus D	Hus E	Hus F
Transmissionstab flader [W]	2311	1867	2645	1435	2900	2956
Transmissionstab kuldebroer [W]	513	682	895	327	559	814
Totalt transmissionstab [W]	2824	2549	3540	1762	3459	3770
Varmetabsramme BR-95	3730	3770	4080	2510	4070	4949
Varmetabsramme BR-2005	3204	3204	3253	2162	3478	4140
Ventilationstab [W]	521	545	1648	540	516	616
Totalt dimensionerende varmetab [W]	3345	3094	5188	2302	3975	4322
Opvarmet etageareal [m ²]	135	145	153	88	133	175
Dim. varmetab pr. m ² etageareal [W/m ²]	25	21	34	26	30	25

Af tabel 8 kan det ses at samtlige 6 forsøgshuse lever op til både den nu gældende og forventede fremtidige skærpede varmetabsramme. Hus A, B, D og F overholder uden problemer den fremtidige varmetabsramme mens hus E lige netop overholder det forventede skærpede krav. Hus C overholder ikke de forventede skærpede krav.

Betrages ventilationstabene for de 6 forsøgshuse, er det tydeligt at der ikke benyttes ventilation med varmegenvinding i hus C. Havde man, ligesom for de øvrige huse, benyttet effektiv varmegenvinding i dette hus, ville ventilationstabet kunne reduceres fra 1648 W til ca. 650 W.

For at sammenligne husenes dimensionerende varmetab, fastlægges størrelsen af dette pr. m² opvarmet etageareal. Af tabellen kan det ses at denne størrelse varierer fra 21 W/m² til 34 W/m². Den højeste værdi forekommer forventeligt for det naturligt ventilerede hus, og havde man, som omtalt ovenfor, benyttet effektiv varmegenvinding i dette hus, ville det dimensionerende varmetab pr. m² opvarmet etageareal i stedet have været ca. 27 W/m².

5.3 Energiforbrug

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de detaljerede simuleringer af det forventede energiforbrug og indeklimate i de enkelte forsøgshuse. Simuleringerne er for alle huse foretaget vha. simuleringsprogrammet BSIM2000 undtagen hus E hvor BSIM2000's forløber, tsbi3, er benyttet.

Modellerne inkluderer effekten af den effektive varmekapacitet, solindfald samt detaljerede beskrivelser af de anvendte varme- og ventilationssystemer.

I det efterfølgende gives en kortfattet gennemgang af de vigtigste aspekter i modelopbygningen.

5.3.1 Kuldebroer

Kuldebroernes betydning medtages i simuleringerne ved at forhøje varmeledningsevnen for isoleringsmaterialet i ydervæggen. Effekten af vinduernes rudekant kan medtages direkte ved definerings af vinduer BSIM2000.

Kuldebroen i forbindelse med fundamentet vil ligeledes skulle fastlægges på baggrund af en temperaturforskel på 30 °C (gulvvarmeslangernes temperatur) minus udetemperaturen 5 °C (middel for fyringssæsonen). For at medtage dette forhold i beregningerne øges kuldebroens størrelse med en faktor som tilsvarende forholdet mellem de aktuelle temperaturforhold og de modellerede temperaturforhold, svarende til: $(30-5)/(20-5) = 1,67$.

5.3.2 Infiltration/exfiltration

Husene som har effektiv varmegenvinding antages at være ”særligt tætte”, hvorfor der iht. DS418 kan regnes med et luftskifte pga. utætheder i klimaskærmen på 0,1 h⁻¹. For huset med naturlig ventilation er der regnet med et totalt luftskifte på 0,5 h⁻¹ jf. Bygningsreglementets krav.

5.3.3 Intern varmelast

Den gennemsnitlige interne varmelast fra personer, belysning og el-udstyr fastsættes med udgangspunkt i SBI-anvisning 184 [20] og oplægget til energibestemmelser i BR2005, til 5 W/m² opvarmet etageareal i middel for hele den opvarmede del af huset og hele døgnet i fyringssæsonen.

5.3.4 Udluftning

I bygningen antages det at der foretages udluftning ved temperaturer over 24 °C. I tilfælde af at indetemperaturen overstiger denne temperatur igangsættes en udluftning af det pågældende rum med et luftskifte på 5 h⁻¹.

5.3.5 Opvarmning

I samtlige rum defineres opvarmning svarende til en samlet maksimal effekt som tilsvarende husets beregnede dimensionerende varmetab.

Generelt er opvarmningen defineret som radiatoropvarmning, idet det benyttede program ikke gav mulighed for at definere gulvvarme på en fyldestgørende måde da beregningerne blev gennemført. I nyere versioner af programmet er denne funktion tilføjet. Gulvvarmeslangene vil naturligvis have en højere temperatur end rumluften, og derfor defineres zonen under huset (den fiktive zone ”jord”) som havende en temperatur på 0 °C i stedet for de normalt anvendte 10 °C, således at der kompenseres for gulvvarmeslangernes højere temperatur.

5.3.6 Ventilation

I de huse hvor der er mekanisk ventilation med varmegenvinding, fjernes indeluft svarende til hhv. til 20 l/s fra køkken, 15 l/s fra baderum og 10 l/s fra bryggers/entre. I de øvrige rum tilføres der totalt en tilsvarende luftmængde så der opnås balance i ventilationen. Temperaturvirkningsgraden for varmegenvindingen fastsættes ud fra producentens oplysninger. I det naturligt ventilerede hus defineres luftskiftet ved en infiltration, se afsnit 5.3.2.

5.3.7 Simulering

I simuleringen benyttes referenceåret Design Reference Year (Danmark.DRY) 1990 som udvendigt klima. Som model for beregning af solindfald er anvendt Perez [21].

5.3.8 Opvarmningsbehov

I tabel 9 er vist de beregnede rumopvarmningsbehov for forsøgshusene. Til sammenligning er vist forsøgshusenes respektive energirammer. Hus C vil naturligvis ikke kunne leve op til de fremtidige skærpede krav, men havde der i stedet for naturlig ventilation været benyttet ventilation med effektiv varmegenvinding, ville kravet kunne opfyldes. I tabellen er for hus C angivet resultater svarende til en situation hvor der er benyttet ventilation med effektiv varmegenvinding.

Tabel 9. Energiforbrug, beregnet.

	Hus A	Hus B	Hus C	Hus D	Hus E	Hus F
Energiforbrug [kWh]	4932	3747	5084	2901	5831*	6997
Energiramme, BR-95 [kWh]	10500	11278	10115	6845	10344	13611
Reduktion ift. BR-95 [%]	53	67	50	58	44	49

* beregningen af opvarmningsbehovet for hus E er ændret i forhold til det opvarmningsbehov som er beregnet i forbindelse med den rapport som tidligere er udkommet vedrørende dette hus. Årsagen til afvigelsen er, at der i forbindelse med de tidligere gennemførte beregninger har været behæftet med fejl i forbindelse med beregningen af de interne varmetilskud, således at disse er fastlagt på baggrund af nettoarealet frem for bruttoarealet.

Af tabel 9 kan det ses, at samtlige 6 huse kan forventes at opfylde projektets formål, svarende til en reduktion af opvarmningsbehovet med mindst 33 %. Hus B giver den største reduktion af opvarmningsbehovet mens hus E giver den mindste reduktion.

Hus A og hus E er bygget ud fra de samme principper (skalmurede porebetonelementer), og derfor burde man i forbindelse med hus E, kunne opnå nogenlunde samme reduktion i opvarmningsbehovet som i hus A. Hus E er, som tidligere omtalt, bygget i forbindelse med et separat projekt, hvor man som udgangspunkt sigtede efter en reduktion på 33 %, men ikke forsøgte at gå meget videre end dette. Hus A vidner om, hvor meget længere man kan nå, og sammenholder man dette med de øvrige resultater, kan man altså konkludere at der uden store problemer kunne opnås en reduktion i opvarmningsbehovet på mindst 50 % uanset hvilket byggesystem der er tale om.

5.4 Bruttoenergiramme – Bygningsreglement 2005

I september 2001 udsendte Statens Byggeforskningsinstitut (By og Byg) et oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 (og skitser til bestemmelser i år 2012). Oplægget går kort fortalt ud på, at der ikke kun skal fokuseres på bygningens varmeisolering, men også på energieffektiv bygningsudformning og installationer samt størst mulig udnyttelse af solenergi. Der er derfor lagt op til at energirammen skal beregnes som energibehovet til opvarmning, ventilation og køling, som indeholder varmebehovet til rumopvarmning og varmt brugsvand, energitabet og el-behovet i kedelanlæg, el-behovet til pumper i varme- og varmtvandsanlæg, el-behovet til ventilatorer samt el-behovet til køling. Energibehovet bestemmes som summen af varmebehovene plus 3 gange summen af el-behovene. Denne faktor 3 svarer nogenlunde til prisforskel og forskel på primær energiforbrug og miljøbelastning ved henholdsvis varme- og elforbrug. Varme- og elproduktion fra solenergianlæg (solvarme- og solcelleanlæg) i bygningen kan modregnes.

Energirammen for boliger i ét plan er i oplægget til nye energibestemmelser fastsat til 75 kWh/m² pr. år. Dvs. at husets samlede energibehov til opvarmning, varmt brugsvand, ventilation og køling højest må antage denne værdi. I tabel 10 er vist bruttoenergirammerne for hvert af de 6 forsøgshuse.

Tabel 10. Bruttoenergiramme for de 6 forsøgshuse.

	Hus A	Hus B	Hus C	Hus D	Hus E	Hus F
Bruttoenergiramme [kWh]	10125	10875	11305	6600	9975	13125

I tabel 11 er opstillet bruttoenergirammer iht. ovennævnte oplæg for hvert af de 6 forsøgshuse.

BEREGNEDE ENERGIMÆSSIGE FORHOLD

Tabel 11. Bruttoenergiberegning for forsøgshusene. Alle tal er i kWh.

Varme- og elbehov	Hus A		Hus B		Hus C		Hus D		Hus E		Hus F	
	Energi-behov	Energi-ramme	Energi-behov	Energi-ramme	Energi-behov	Energi-ramme	Energi-behov	Energi-ramme	Energi-behov	Energi-ramme	Energi-behov	Energi-ramme
Rumopvarmning ¹	4932	4932	3747	3747	8527	8527	2901	2901	5831	5831	6997	6997
Varmt brugsvand (VBV) ²	1875	1875	2014	2014	2125	2125	1222	1222	1847	1847	2431	2431
Varmetab fra VV-Beholder ³	633	253	656	262	673	269	529	212	629	252	722	289
Varmetab fra VV-rør ⁴	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Varmetab fra VBV-rør ⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
El-behov i varmeanlæg ⁶	111	333	112	336	251	753	102	305	111	333	120	360
El-behov i kedelanlæg ⁷	0	0	0	0	278	834	0	0	0	0	0	0
El-behov i VBV-anlæg ⁸	0	0	0	0	44	132	0	0	109	327	0	0
El-behov i ventilationsanlæg ⁹	735	2205	1156	3468	25	75	394	1183	1156	3468	735	2205
El-behov køling ¹⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I alt	-	9598	-	9827	-	12715	-	5823	-	12058	-	12282
Bruttoenergiramme		10125		10875		11305		6600		9975		13125

¹ Husets opvarmningsbehov jf. afsnit 5.3.8² 50 MJ/m²/år, hvilket svarer til 265 liter/m²/år ved opvarmning fra 10 til 55 °C.³ 60 % kommer huset til nytte⁴ Der regnes ikke med varmetab fra varmerør i den opv. del af bygn.⁵ Der regnes ikke med varmetab fra varmtvandrør i den opvarmede del af bygningerne.⁶ Hus A, B, D, E og F: Lille pumpe i konstant drift i fyringssæson. Hus C: 45 W pumpe i konstant drift i fyringssæson.⁷ Hus A, B, D, E og F: Ingen cirkulation. Hus C: Cirkulationspumpe i kedelanlæg 50 W, konstant drift i fyringssæson.⁸ Hus A og D: Ingen VBV cirkulation, Hus B og E: Cirkulationspumpe der betjener én bolig. Hus C: Cirkulationspumpe 60 W.⁹ Hus A: 84 W. Hus B: 132 W. Hus D: 45 W. Hus E: 132 W. Hus F: 84 W. Drifttid: Hele året. Hus C: 34 W. Drifttid: 2 timer/døgn.¹⁰ Ingen køling installeret.

Ved at sammenligne de beregnede bruttoenergiforbrug angivet i tabel 11 med bruttoenergirammerne, er det tydeligt at hus A, B, D og F lever op til de forventede krav mens hus C og E ikke lever op til kravene.

For hus C's vedkommende er der tale om et problem som bl.a. skyldes at huset har naturlig ventilation frem for mekanisk ventilation med varmegenvinding. For at kunne opfylde de bruttoenergirammekravet skal huset udstyres med et energieffektivt ventilationsanlæg med varmegenvinding, dvs. et anlæg med både høj genvindingsgrad (85-90 %) og f.eks. el-besparende DC-motorer frem for AC-motorer. F.eks. kunne et anlæg svarende til det som er benyttet i hus D anvendes. Huset er generelt dårligere isoleret end de øvrige huse, det er i 1½ plan og så har det eget fyr, hvilket alt i alt gør det mindre sammenligneligt med de øvrige huse.

For hus E's vedkommende er der tale om en kombination af effekter som medfører at bruttoenergirammen ikke kan overholdes. For det første er energiforbruget til rumopvarmning relativt højt. Hvis man igen sammenligner med hus A, som er bygget på samme principper og har ca. samme opvarmede etageareal, vil man kunne se at energiforbruget til rumopvarmning er næsten 18 % højere for hus E end for hus A. Bedre vinduer og mere isolering i konstruktionerne ville altså kunne nedbringe bruttoenergiforbruget med ca. 900 kWh. For det andet er el-behovet i ventilationsanlægget meget højt for hus E, og man kunne halvere dette behov ved, som nævnt ovenfor, at udskifte AC-motorerne i aggregatet med el-besparende DC-motorer. Dette ville spare ca. 1700 kWh, og tilsammen kunne disse to tiltag spare ca. 2600 kWh i det samlede regnestykke, og hermed ville hus E også kunne leve op til de forventede bruttoenergirammekrav i 2005.

Forsøgshusene beskrevet i denne rapport er, som tidligere omtalt, udviklet før bruttoenergi-princippet blev fastlagt som grundlaget for fremtidens Bygningsreglement i 2005. Derfor kan det ikke forventes at samtlige huse lever op til disse krav, men ovenstående viser at kravene ikke vil være vanskelige at leve op til, hvis man vælger de gode og energirigtige løsninger for både klimaskærm og installationer.

5.5 Indeklima

Der er foretaget simuleringer af de forventede temperaturforhold i forsøgshusene, og disse sammenholdes med specifikationer i norm vedrørende termisk indeklima, DS 474 [22]. Simuleringerne er foretaget vha. programmet BSIM2000. For hus E og F er disse analyser ikke gennemført. For hus E er analyserne gennemført før de tilsvarende analyser for de øvrige huse, og er derfor ikke direkte sammenlignelige med disse. For hus F's vedkommende er analyserne ikke gennemført da huset ikke kunne opføres, og samtlige detaljer ikke var besluttet.

I analyserne er det valgt at betragte det mest kritiske rum og det mindst kritiske rum i hvert hus, svarende til hhv. rummet med det største solindfald og rummet med det mindste solindfald. I tabel 12 er angivet hhv. mest og mindst kritiske rum for de 4 forsøgshuse hvor analyserne er gennemført.

Tabel 12. Mest og mindst kritiske rum mht. indeklima.

	Mest kritiske	Mindst kritiske
Hus A	Køkken/alrum	Soveværelse
Hus B	Stue/alrum	Soveværelse
Hus C	Værelse 1	WC
Hus D	Værelse	Soveværelse

I huse hvor der er mekanisk ventilation med varmegenvinding, bypasses enheden i sommerperioden, svarende til at der ventileres direkte med udeluft.

Norm for specifikation af termisk indeklima [22] specificerer kravene til den operative temperatur for varme dage med let sommerbeklædning og stillesiddende aktivitet som følger:

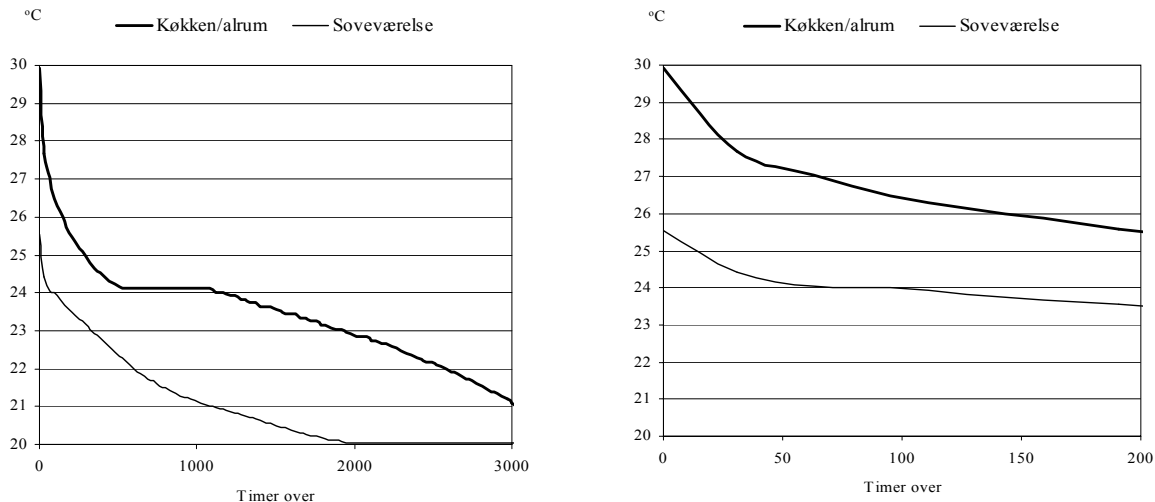
>26 °C i højest 100 timer i opholdstiden i løbet af et typisk år.

>27 °C i højest 25 timer.

Opholdstiden defineres som det tidsrum, udover ganske korte tidsrum, hvor mennesker opholder sig i rummet. Generelt for alle husene er, at der i forbindelse med indetemperaturer over 24 °C igangsættes udluftning ved åbning af vinduer, tilsvarende et luftskifte på 5 h⁻¹.

5.5.1 Hus A

I figur 38 er vist to akkumulerede temperaturkurver, der for en given temperatur viser, hvor mange timer indetemperaturen overstiger denne i sommerperioden. Kurven til højre er et udsnit af kurven til venstre.



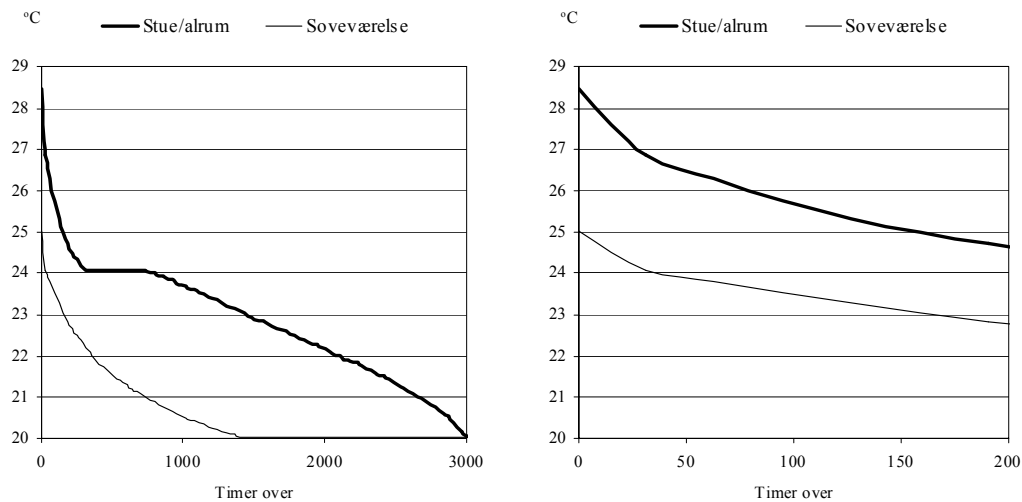
Figur 38. Antal timer hvor indetemperaturen overstiger en given temperatur i uge 19-37.

Sammenligner man resultaterne for køkken/alrum med kravene i normen, ses at kravet til antal timer over 26 °C og 27 °C ikke er overholdt. Det er dog antaget at der opholder sig mennesker i stue/alrum i alle de timer hvor overtemperaturerne forekommer, hvilket i praksis ikke er tilfældet. Antages det at ingen opholder sig i rummet fra kl. 9 til kl.16, overskrides temperaturen 26 °C i kun ca. 95 timer, mens 27 °C overskrides i ca. 45 timer i opholdstiden. Med disse forudsætninger er komfortkravet vedrørende de 26 °C netop overholdt, mens der er næsten dobbelt så mange timer med temperaturer over 27 °C end tilladt.

På baggrund af analyserne må det konkluderes at huset kun delvis opfylder komfortkravene. Grunden til at det "går galt", skyldes primært den relativt høje solenergitransmittans for ruden og det relativt store overvejende sydvestvendte vinduesareal i køkken/alrum samt et udhæng med forholdsvis lille skyggevirkning. Problemer med overtemperaturer vil kunne fjernes ved anvendelse af en effektiv (udvendig) solafskærmning.

5.5.2 Hus B

I figur 39 er vist to akkumulerede temperaturkurver.



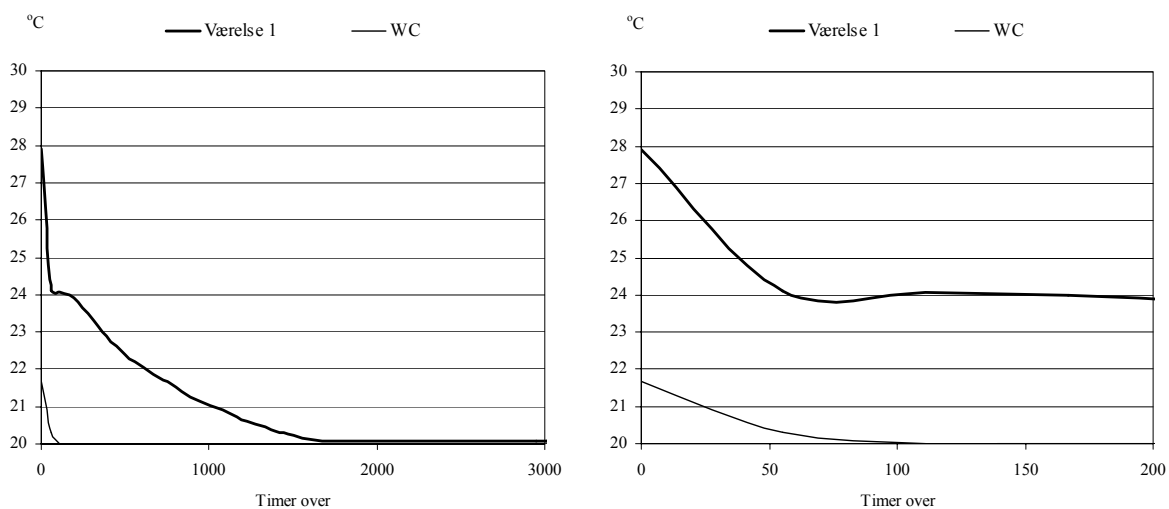
Figur 39. Antal timer hvor indetemperaturen overstiger en given temperatur i uge 19-37.

Sammenligner man resultaterne for stue/alrum med kravene i normen, ses at kravet til antal timer over 26 °C netop er overholdt, mens kravet til timer over 27 °C ikke er overholdt. Igen er det antaget at der opholder sig mennesker i stue/alrum i alle de timer hvor overtemperaturerne forekommer. Antages det at ingen opholder sig i rummet fra kl. 9 til kl.16, overskrides temperaturen 26 °C i kun ca. 30 timer, mens 27 °C overskrides i ca. 15 timer i opholdstiden.

På baggrund af analyserne må det altså konkluderes at huset opfylder komfortkravene.

5.5.3 Hus C

I figur 40 er vist to akkumulerede temperaturkurver, der for en given temperatur viser, hvor mange timer indetemperaturen overstiger denne i sommerperioden.

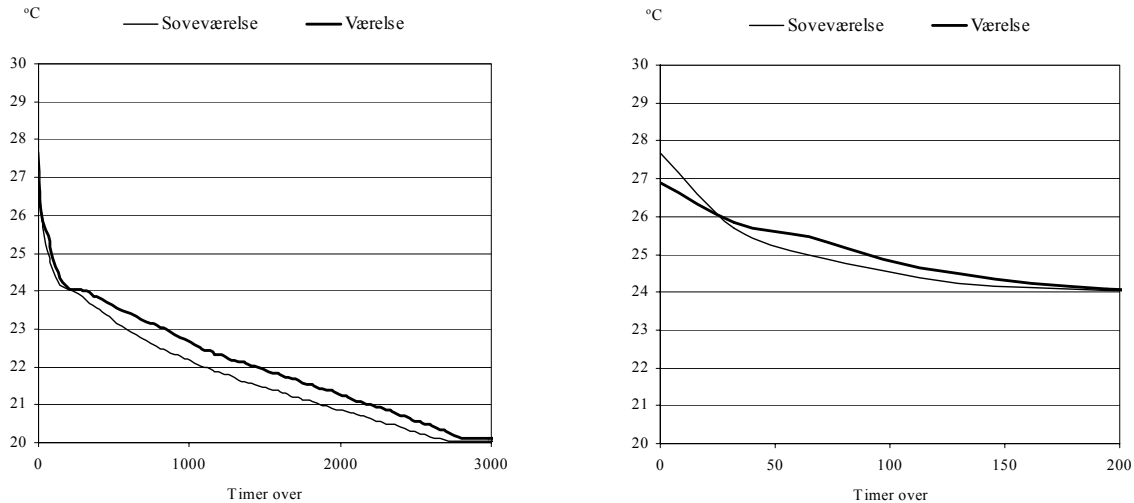


Figur 40. Antal timer hvor indetemperaturen overstiger en given temperatur i uge 19-37.

Sammenligner man resultaterne for køkken/alrum med kravene i normen, ses at både kravet til antal timer over 26 °C, og kravet til timer over 27 °C er overholdt, og det konkluderes således at komfortkravene er overholdt.

5.5.4 Hus D

I figur 41 er vist to akkumulerede temperaturkurver, der for en given temperatur viser, hvor mange timer indetemperaturen overstiger denne i sommerperioden.



Figur 41. Antal timer hvor indetemperaturen overstiger en given temperatur i sommerperioden (uge 19-37).

Sammenligner man resultaterne for soveværelse med kravene i normen, ses at kravet til antal timer over 26 °C og 27 °C er overholdt. Det er bemærkelsesværdigt at den maksimale temperatur der forekommer er højere for soveværelset end for værelset. Forskellen på de to kurver er dog meget lille, og da der er tale om hhv. et øst- og et vestvendt rum som betragtes i fyringssæsonen, vil solindfaldet ikke være væsentligt forskelligt i de to rum, og dette kunne forklare fænomenet. I Soveværelset er der ca. 10 timer over 27 °C mens der er ca. 30 timer over 26 °C. I værelset er der ingen timer over 27 °C og ca. 30 timer over 26 °C. Det må altså konkluderes at huset opfylder komfortkravene.

6 MÅLINGER AF OPVARMNINGSBEHOV OG LUFTTÆTHED

I dette kapitel gennemgås de målinger som er foretaget for forsøgshusene. Først og fremmest er der foretaget målinger af energiforbrug samt inde- og udeklima. Disse målinger benyttes til sammenligning med de tidligere omtalte simuleringer af husene, for at undersøge hvorvidt der er overensstemmelse mellem det teoretisk beregnede varmebehov og det målte varmebehov. Herudover er der foretaget målinger af luftskiftet for husene, for at fastlægge hvor stor en infiltration der forekommer. Sidstnævnte måling er vigtig for at opnå det bedst mulige sammenligningsgrundlag mellem simuleringer og målinger.

Der er udført målinger for hus A, B og E. For hus C, D og F er der endnu ikke gennemført målinger af energiforbrug. For hus C og D vil der blive foretaget målinger i løbet af fyringssæsonen 2003 – 2004. Hus F bliver ikke opført, og derfor er der ikke blive foretaget målinger for dette hus.

6.1 Luftskiftemålinger

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de målinger der er gennemført med henblik på at fastlægge lufttætheden af de 3 forsøgshuse. Luftskiftet for husene er fastlagt på baggrund af en sporgasmåling. Vurderingen af hvor utætte husene er samt eventuelle utætheders placering i klimaskærmen fastlægges vha. trykprøvninger. Begge metoder beskrives kortfattet i det følgende.

6.1.1 Sporgasmåling

Sporgasmålinger er udelukkende udført for hus A og hus E.

Luftskiftet for huset, forstået som luftskiftet pga. utætheder i klimaskærmen, bestemmes på baggrund af den Europæiske standard ISO/FDIS 12569:2000 [23]. Der benyttes ”fald i koncentration” - metoden.

Yderdøre, vinduer og loftslem blev holdt lukket mens indvendige døre var åbne under målingerne. Indblæsnings- og udsugningsventiler for ventilationsanlægget samt udsugningen til komfuret blev forseglet vha. plastik. Opsamlingsrør blev placeret på udvalgte steder 1,7 m over gulvet.

Gassen blev doseret manuelt, og fordelt jævnt vha. små ventilatorer. Efter at have opnået en god ensartet koncentration, blev opsamlingspunkterne aflæst ca. hvert 6. minut. Typisk har det taget ca. ½ time at opnå en god opblanding af luften, svarende til at samtlige opsamlingsrør måler nogenlunde samme koncentration. Til sidst kunne luftskiftet bestemmes ud fra ændringen i gaskoncentrationen.

I tabel 13 er opstillet resultaterne af sporgasmålingerne for hus A og E forsøgshuse.

Tabel 13. Resultater af sporgasmålinger.

Hus	Gennemsnitligt Luftskifte [h^{-1}]
A	0,11
E	0,12

Disse resultater vidner om at husene har en rimeligt god tæthed, men altså en anelse dårligere end de forventede $0,1 \text{ h}^{-1}$. De målte værdier for luftskiftet i de to huse benyttes senere i forbindelse med at der foretages korrigerede beregninger af det samlede forventede opvarmningsbehov for husene.

6.1.2 Trykprøvning

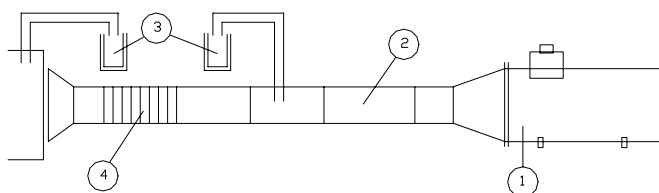
Der er blevet foretaget trykprøvninger af hus A, C og D med henblik på bestemmelse af hvor huset er utæt og utæthedernes omfang. Den europæiske standard EN 13829:2000 [24] beskriver hvordan en trykprøvning skal foretages.

Det skal bemærkes at målingernes nøjagtighed afhænger af det anvendte udstyr og de aktuelle vejrforhold da prøvningerne blev foretaget. Metoden kan ikke benyttes til at fastlægge den naturlige luftinfiltration, denne kan i stedet bestemmes ved sporgasmålinger som omtalt i tidligere afsnit.

Metodens overordnede princip er at måle hvilken luftmængde der skal fjernes/tilføres huset for at opnå en bestemt trykforskel over klimaskærmen. Vinduer og yderdøre blev holdt lukket og det mekaniske ventilationssystems udsugnings- og indblæsningsventiler blev forseglet med plastfolie og tape under målingerne. Desuden blev emhætten forseglet. Gennem forsøgene var alle indvendige døre åbne, således at trykforskellen kunne fordeles over hele huset.

For hus C's vedkommende, blev samtlige friskluftventiler forseglet med tape. Herved vil trykprøvningen udelukkende inkludere de utætheder som findes i klimaskærmens samlinger mv., dvs. svarende til infiltrationen. Da huset er naturligt ventileret, svarende til at man forventer et samlet ventilation på $0,5 \text{ h}^{-1}$, må den resterende del af ventilationen, dvs. forskellen mellem det af trykprøvningen bestemte luftskifte og den samlede ventilation på $0,5 \text{ h}^{-1}$, forekomme som ventilation gennem friskluftventiler og mekaniske ventilatorer.

Trykforskellen over klimaskærmen blev etableret vha. en ventilator forbundet til klimaskærmen via plade med studs monteret i et vindue. I nedenstående Figur 42 er måleopstillingen skitseret:



Figur 42. Måleopstilling: 1. Ventilator med variabel hastighed (Veab Lackagematøre type 600). 2. Pitot-rør (målerør), diameter 100 mm. 3. Mikromanometre til måling af trykforskel mellem ude og inde samt luftmængde. 4. En flexslange til at forbinde målerør/ventilator med plade i vindue.

Samlinger mellem udstyret og klimaskærmen/vinduet blev naturligvis tætnet, så potentielle utætheder herfra ikke skulle influere på resultaterne. Den udvendige trykslange var placeret i perforeret boks og derved beskyttet mod direkte vindpåvirkninger. Derefter kunne trykforskellen uden tændt ventilator bestemmes, dvs. den naturlige trykforskel, idet der er krav til at denne "nul-flow trykforskel" ikke må overstige 5 Pa når forsøget gennemføres. Der blev foretaget to måleserier med hhv. over- og undertryk. For hver måleserie var det ønskeligt at få datapunkter mellem 10 Pa og 60 Pa (med et spring på højst 10 Pa). I nogle af husene kunne der dog ikke opnås en trykforskel på 60 Pa, og derfor blev der anvendt mindre spring mellem målepunkterne i disse tilfælde.

Med maksimal trykforskel påført husene, blev samlinger mm. undersøgt for utætheder, idet potentielle luftstrømme blev forsøgt visualiseret med specielt røgudviklingsudstyr. Ydervægge og vinduer/døre samt samlinger mellem bygningsdele blev undersøgt, det samme blev eventuelle loftslemme, halogenspots og stikkontakter. Termografering blev også anvendt til at spore potentielle utætheder, og desuden til generelt at påvise kuldebroer. Indvendig termografering er specielt velegnet når der påtrykkes undertryk, idet der derved vil være en kold luftstrøm ind i huset gennem utæthederne.

I tabel 14 er angivet middelværdier af luftskiftet for forsøgshusene ved en trykforskel på 50 Pa. Middelværdien er fundet som gennemsnittet for målingen ved 50 Pa overtryk og målingen ved 50 Pa undertryk.

Tabel 14. Middelværdier af luftskifte, n_{50} , ved 50 Pa trykforskel.

Hus	Gennemsnitligt Luftskifte [h^{-1}]
A	1,63
C	2,44
E	1,54

Der er ved sporgasmålinger beregnet en naturlig luftinfiltration på $0,11 \text{ h}^{-1}$. Da denne måling er meget afhængig af de konkrete temperatur- og vindforhold på måletidspunktet, er der behov for en vurdering af det gennemsnitlige årlige luftskifte. I den europæiske norm prEN ISO 13790 [25] er der i annex G angivet en formel for den tillægsluftstrøm (V_x) der skyldes infiltration/eksfiltration gennem utætheder i klimaskærmen:

$$\dot{V}_x = \frac{V \cdot n_{50} \cdot e}{1 + \frac{f}{e} \cdot \left| \frac{V_{\text{sup}} - V_{\text{ex}}}{V \cdot n_{50}} \right|^2}$$

hvor

V = det indvendig luftvolumen

V_{sup} = indblæsningsluftmængden

V_{ex} = udsugningsluftmængden

n_{50} = luftskiftet ved trykforskel på 50 Pa (se ovenfor)

Og e og f er koefficienter der udtrykker hvor godt huset er beskyttet mod vindpåvirkninger.

Idet V_{sup} og V_{ex} antages lige store, og huset regnes for at være moderat beskyttet ($e = 0,07$), kan følgende værdier, og dermed luftskifter beregnes for forsøgshusene.

Tabel 15. Luftskifte for forsøgshusene baseret på trykprøvninger.

Hus	V_x [m^3/h]	Ækvivalent Luftskifte [h^{-1}]
A	30	0,11
C	52	0,17
E	28	0,11

Af resultaterne i tabel 15 er det tydeligt at hus A og E har en god lufttæthed, og sammenligner man luftskiftet bestemt på baggrund af trykprøvningen med tilsvarende fra sporgasmålingerne ses, at der er en god overensstemmelse.

For hus C fås et luftskifte som er en anelse større. Dette er, som tidligere omtalt forventeligt, da huset har naturlig ventilation, hvor man ikke har fokuseret på at gøre huset så lufttæt som muligt.

6.1.3 Konklusion og diskussion

Overordnet kan konkluderes, at klimaskærmen har en rimeligt god tæthed i de 3 analyserede forsøgshuse. Erfaringer fra målinger på tilsvarende enfamiliehuse viser, at hvis der er særlig fokus på tætheden af klimaskærmen, er det muligt at opnå et luftskifte på ca. $1,5 \text{ h}^{-1}$ ved 50 Pa trykforskel.

I Tyskland er der særlige forskrifter (DIN norm 4108 [26]) for hvad luftskiftet må være. For huse med mekanisk ventilation med varmegenvinding må luftskiftet ved 50 Pa trykforskel højst være $1,5 \text{ h}^{-1}$, og for naturligt ventilerede huse må luftskiftet højest være $3,0 \text{ h}^{-1}$. Sammenligner man disse grænseværdier med resultaterne af målingerne beskrevet i afsnit 6.1.2, er det tydeligt at hus A og E næsten kan leve op til disse krav, mens hus C uden problemer opfylder kravet.

I hus A har hverken røgudviklingsudstyr eller termografering kunnet påvise betydelige eller uventede utætheder i klimaskærmen. Halogen-spots og loftlem, som erfaringsmæssigt kan give problemer, viste ikke tydelige tegn på utætheder, og alt i alt må huset siges at have en god tæthed.

I hus C viste både røgudviklingsudstyr og termografering en væsentlig utæthed i klimaskærmen i forbindelse med samlingen mellem etagedæk og ydervæg. Denne utæthed vurderes at være hovedårsagen til det relativt høje luftskifte der er målt. Byggefirmaet oplyser at man er opmærksom på dette, og at man i forbindelse med huse med mekanisk ventilation med varmegenvinding netop sørger for en meget grundig tætning ved samlingen mellem ydervæg og etageadskillelse.

For hus E's vedkommende kunne utætheder i forbindelse med halogen-spots og loftslem spores ved hjælp af røgudviklingsudstyr. Der blev gennemført en ekstra sporgas-måling hvor disse områder blev forseglet med tape og plastik, og for dette tilfælde blev det naturlige luftskifte reduceret fra de tidligere målte $0,12 \text{ h}^{-1}$ til $0,07 \text{ h}^{-1}$. Termografering af klimaskærmen viste et par uventede kuldebroer, bl.a. midt på en ydervæg. Ydervæggen blev åbnet og man fandt ud af at der var en stor samling mørtel i hulumuren. Mørtlen blev naturligvis fjernet.

I forbindelse med bygninger med mekanisk ventilation med varmegenvinding, er det vigtigt at reducere luftskiftet gennem utætheder til et minimum. Et eksempel kan illustrere betydningen.

Vi betragter hus A. I henhold til Bygningsreglementet skal der udskiftes en luftmængde på mindst 60 l/s for dette hus, svarende til et luftskifte på ca. $0,8 \text{ h}^{-1}$. For huse med et normalt tæthedsniveau kan man regne med et luftskifte pga. utætheder i klimaskærmen på $0,2 \text{ h}^{-1}$ (jf. DS418 – Beregning af bygninger varmetab). Den mekaniske ventilation er udstyret med varmegenvinding, som genvinder ca. 90 % af varmen i udsugningsluften, hvilket vil sige at det reelle luftskifte (den mængde udeluft der opvarmes til rumtemperatur) svarer til ca. $0,1 \text{ h}^{-1}$. Hvis luftskiftet pga. utætheder er $0,2 \text{ h}^{-1}$, vil infiltrationstabt alene udgøre 2/3 af det samlede ventilationstab, svarende til ca. 1500 kWh/år eller ca. 27 % af det samlede opvarmningsbehov for huset. Det kan derfor konkluderes at lufttætheden er utrolig vigtig, især når der er tale om lavenergihuse med mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Erfaringer fra lignende forsøgshusbyggerier viser, at infiltrationstabet kan reduceres til under $0,10 \text{ h}^{-1}$, men det kræver dog at der udøves særlig omhu ved tætning af samlinger, gennembrydninger mv. Det er også erfaringen at den gode tæthed kan opnås ved konsekvent planlægning og omhyggelig udførelse og reparation af uundgåelige huller. Det er på ingen måde nødvendigt at anvende kompliceret og bekostelig teknologi.

6.2 Energiforbrug og indeklima

I dette afsnit gennemgås de målinger der er gennemført af forsøgshusenes energiforbrug og indeklima. Der er udelukkende foretaget detaljerede målinger af energiforbrug og indeklima for hus A, B og E. For hus A og B er der tale om meget korte detaljerede måleperioder, idet måleudstyret først var installeret meget sent i projektforsøbet, men også fordi at der i forbindelse med målinger af solindfald kun var et sæt solarimetre til rådighed, som således skulle flyttes fra sted til sted. Målingerne bliver dog fortsat for hus A og B (dog uden målinger af solindfald), og derfor vil der også blive præsenteret resultater for længere perioder, således at forsøgshusenes opvarmningsbehov i højere grad belyses.

Mere detaljerede beskrivelser af målingerne er givet i de tre rapporter ”Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 2: Måling af opvarmningsbehov. Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer” [27], ”Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 2: Måling af opvarmningsbehov. Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet” [28] og ”Typehus svarende til BR-2005 – energikrav. Del 2: Måling af opvarmningsbehov for typehus” [29].

Målingerne fortsættes i de tre huse og måleudstyr opsættes ligeledes i hus D, og i forbindelse med et andet projekt hvor der fokuseres på bruttoenergiforbruget for husene, vil disse målinger blive dokumenteret.

6.2.1 Hus A. Skalmurede porebetonelementer

I tabel 16 er opstillet måleresultater for hus A.

Tabel 16. Måleresultater for hus A

Målinger påbegyndt	24.01.2003
Målinger afsluttet	10.02.2003
Måleperiode	18 dage
Beboet/ubeboet	Ubeboet
Målte data	
Udetemperatur, middel	-0,3 °C
Totalt solindfald	70 kWh
Indetemperatur, middel	20,1 °C
Effektivitet af varmegenvinder	82 %
Målt energiforbrug til opvarmning	867 kWh

Huset har som angivet været ubeboet i måleperioden, og dette har naturligvis afgørende betydning for det interne varmetilskud. Ved sammenligning mellem det målte energiforbrug til opvarmning med tilsvarende beregnede forbrug skal der tages højde for dette. Ved at kigge på elforbruget for den pågældende periode konkluderes, at det interne varmetilskud for perioden har været ca. 130 kWh, svarende til ca. 300 W. Til sammenligning kan nævnes at det forventede interne varmetilskud vil være $5 \text{ W/m}^2 \times 135 \text{ m}^2 = 675 \text{ W}$ under beboede forhold.

Varmegenvindingen har i perioden gennemsnitligt været 82 %, hvilket er lidt lavere end de forventede 85-90 %. Årsagen til dette er, at man for at undgå tilisning af aggregatet ved meget lave udetemperaturer, regulerer indblæsning og udsugning, således at tilisning undgås. Dette bevirker imidlertid at effektiviteten reduceres væsentligt i disse situationer, hvilket afspejler den relativt lave gennemsnitlige effektivitet. Målingerne viser i øvrigt at effektiviteten er 85 % under normale driftsforhold, og analyser viser at der kun i ca. 200 timer pr. år vil forekomme situationer hvor effektiviteten vil ligge lavere. Derfor vil man på årsbasis kunne forvente en gennemsnitlig temperaturvirkningsgrad som er meget tæt på de 85 %, og dette benyttes derfor i den senere simulering af det korrigerede forventede opvarmningsbehov for huset.

Foretager man en simplificeret beregning af det forventede opvarmningsbehov for den pågældende periode, kan dette fastlægges til ca. 892 kWh. Dette opvarmningsbehov, som er baseret på en total varmetabskoefficient for huset på 124 W/K, er en smule højere end det målte, og forskellen kunne f.eks. svare til at den reelle totale varmetabskoefficient for huset er 121 W/K i stedet for 124 W/K. I tabel 17 er der opstillet en varmebalance for den simple beregning.

Tabel 17: Beregnet energibalance for perioden 24.01.2003 til 10.02.2003, simpel.

Energibalance		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	892
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-147
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	70
Q_{udst}	Varme tilført fra udstyr	130
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-848
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-98

De detaljerede målinger af husets energiforbrug til opvarmning har til formål at underbygge beregningerne af det totale forventede årlige energiforbrug til opvarmning beregnet i foregående kapitel. Som det fremgår af de detaljerede målinger af luftskifte og energiforbrug, er der en række parametre som ikke stemmer overens med de antagelser der blev gjort i forbindelse med simuleringerne beskrevet i foregående kapitel. Nedenfor er kort beskrevet de parametre som afviger fra de forventede.

Husets luftskifte er forventet at være $0,10 \text{ h}^{-1}$. Detaljerede målinger af luftskiftet har vist at dette er en anelse større, og i den reviderede simuleringsmodel af huset fastsættes denne derfor til $0,11 \text{ h}^{-1}$.

Effektiviteten af varmegenvindingen forventedes at være 85-90 %. De detaljerede målinger viser imidlertid en noget lavere effektivitet på ca. 82 %. Dette ændres ligeledes i simuleringsmodellen.

De interne varmetilskud ændres også i simuleringsmodellen således at de afspejler de aktuelt målte forhold, dvs. svarende til en samlet effekt på ca. 300 W i hele måleperioden.

Inde- og udetemperaturerne samt solpåvirkningen fastsættes også svarende til de målte data, og derefter foretages en simulering svarende til måleperioden.

I tabel 18 er opstillet resultaterne af den detaljerede simulering.

Tabel 18. Beregnet energibalance for perioden 24.01.2003 til 10.02.2003, BSIM 2000.

Energibalance	[kWh]
Q_{opv} Energiforbrug til opvarmning	855
Q_{inf} Nettobidrag ved infiltration	-143
Q_{udl} Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol} Energi tilført ved solindfald	63
Q_{udst} Varme tilført fra udstyr	130
Q_{trans} Trans. tab via klimaskærm	-809
Q_{mix} Vent. tab til naborum	0
Q_{vent} Vent. tab via ventilationsanlæg	-96

Sammenlignes resultaterne af den detaljerede beregning med den simple beregning er det tydeligt at den primære forskel ligger i beregningen af transmissionstab og solindfaldet. For transmissions-tabet vedkommende skyldes det primært det forhold, at BSIM tager hensyn til konstruktionernes varmekapacitet. Der er dog også andre forhold som spiller ind, men da der ikke er tale om større afvigelser skal disse forhold ikke diskuteres mere i nærværende sammenhæng.

Der er således en god overensstemmelse mellem den benyttede detaljerede beregningsmodel og de målte data, og derfor kan man nu foretage en detaljeret beregning af det forventede årlige opvarmningsbehov, baseret på referenceåret DRY. I tabel 19 er resultaterne opstillet, og til sammenligning er vist varmebalancen som den blev beregnet i foregående kapitel. Den korrigerede model svarer til den oprindelige, med korrektion af infiltration og effektivitet af varmegenvinder og de interne varmetilskud er altså fastholdt som 5 W/m^2 . Dette gør sig gældende for samtlige huse.

Tabel 19. Beregnet energibalance for hele året [DRY].

Energibalance	Oprindelig model [kWh]	Korrigeret model [kWh]
Q_{opv} Energiforbrug til opvarmning	4932	5319
Q_{inf} Nettobidrag ved infiltration	-760	-834
Q_{udl} Varmetab ved udluftning	-103	-93
Q_{sol} Energi tilført ved solindfald	1691	1691
Q_{udst} Varme tilført fra udstyr	3747	3747
Q_{trans} Trans. tab via klimaskærm	-8812	-8800
Q_{mix} Vent. tab til naborum	-29	-34
Q_{vent} Vent. tab via ventilationsanlæg	-666	-996

Det årlige opvarmningsbehov er således ca. 400 kWh højere efter ændringerne i modellen. Den primære forskel er ventilationstab, 330 kWh, som skyldes at der i den oprindelige model blev regnet med 90 % varmegenvinding og i den reviderede model regnes med 85 %.

Det korrigerede forventede opvarmningsbehov er således ca. 5300 kWh, hvilket svarer til ca. 50 % af energirammen jf. gældende Bygningsreglement (BR-95).

For yderligere at analysere forsøgshusets opvarmningsbehov gives i det følgende en kort gennemgang af de målinger som er gennemført siden måleudstyret blev installeret og indtil i dag. For hus A svarer dette til perioden fra 01.02.2003 til 01.11.2003. I tabel 20 er opstillet aflæsninger af energiforbruget til opvarmning.

Tabel 20. Hus A. Målt energiforbrug til opvarmning. Akkumuleret.

Dato	Forbrug [kWh]
01-02-2003	0
01-03-2003	861
01-04-2003	1613
01-05-2003	2102
01-06-2003	2260
01-07-2003	2289
01-08-2003	2319
01-09-2003	2350
01-10-2003	2494
01-11-2003	3070

Perioden dækker ikke november, december og januar og derfor er det umiddelbart svært at sammenligne med det forventede opvarmningsbehov. Der gennemføres en simulering af den korregerede BSIM-model, hvor de manglende 3 måneder simuleres. Resultatet af denne beregning viser at opvarmningsbehovet for disse 3 måneder kan forventes at være ca. 3709 kWh, og adderer man dette til resultatet af målingerne for de øvrige 9 måneder, får man et totalt årligt opvarmningsbehov på 6779 kWh.

Hvis man udelukkende betragter fyringssæsonen er det samlede forbrug til opvarmning ca. 250 kWh lavere, svarende til et totalt forbrug for fyringssæsonen på 6529 kWh. Dette forbrug skal sammenholdes med tilsvarende forbrug for simuleringen hvor der tages højde for at det interne varmetilskud er væsentligt lavere end 5 W/m^2 , og resultatet af denne simulering viser et opvarmningsbehov på ca. 7200 kWh. Det faktiske forbrug er således ca. 700 kWh lavere end forventet, men da der i denne sammenligning er en række usikkerheder må der siges at være en rimelig overensstemmelse.

På denne baggrund konkluderes det at forsøgshus A, under normale omstændigheder, har et forventet opvarmningsbehov på ca. 5300 kWh, hvilket svarer til ca. 50 % af den nu gældende energiramme.

6.2.2 Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet

I tabel 21 er opstillet måleresultater for hus B.

Tabel 21. Måleresultater for hus B

Målinger påbegyndt	06.03.2003
Målinger afsluttet	01.04.2003
Måleperiode	27 dage
Beboet/ubeboet	Beboet
Målte data	
Udetemperatur, middel	4,6 °C
Totalt solindfald	443 kWh
Indetemperatur,, middel	21,2 °C
Effektivitet af varmegenvinder	91 %
Målt energiforbrug til opvarmning	370 kWh

Huset har været beboet i måleperioden, og vha. en logbog er der foretaget registreringer af beboernes gøren og laden, således at det kan vurderes hvad de interne varmetilskud har været i perioden. Disse analyser viser et gennemsnitligt internt varmetilskud på $3,7 \text{ W/m}^2$, hvilket svarer til et totalt internt varmetilskud på 348 kWh for perioden. Endvidere har der i perioden været et varmetab/-tilskud fra varmerør mm. på ca. 80 kWh.

Bruttovirkningsgraden for varmegenvindingen har i perioden varieret mellem 84 – 99 %, hvilket stemmer godt overens med forventningen om gennemsnitligt ca. 90 %. Nettovirkningsgraden har varieret mellem 70 – 79 %.

Der er ikke foretaget en detaljeret måling af husets luftskifte pga. problemer med måleapparatet. Målinger på tilsvarende huse, hvor der har været særlig fokus på lufttætheden, er der målt en infiltration på ca. $0,11 \text{ h}^{-1}$. Forsøgshuset kan forventes at have en lufttæthed, der er lidt dårligere, og på denne baggrund regnes der i det følgende med en infiltration på $0,15 \text{ h}^{-1}$. I DS 418, norm for beregning af bygningers varmetab, er til sammenligning angivet en infiltration i normale tilfælde på $0,2 \text{ h}^{-1}$ og for særligt tætte huse på $0,1 \text{ h}^{-1}$.

Foretager man en simplificeret beregning af det forventede opvarmningsbehov for den pågældende periode, kan dette fastlægges til ca. 333 kWh. Dette opvarmningsbehov, som er baseret på en total varmetabskoefficient for huset på 108 W/K, er en smule lavere end den målte. I tabel 22 er der opstillet en varmebalance for den simple beregning.

Tabel 22. Beregnet energibalance for perioden 6.03.2003 til 1.04.2003, simpel.

Energibalance		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	333
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-156
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	443
Q_{udst}	Varme tilført fra udstyr	428
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-949
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-54

De detaljerede målinger af husets energiforbrug til opvarmning har til formål at underbygge beregningerne af det totale forventede årlige energiforbrug til opvarmning beregnet i foregående kapitel. Som det fremgår af de detaljerede målinger af luftskifte og energiforbrug, er der en række parametre som ikke stemmer overens med de antagelser der blev gjort i forbindelse med simuleringerne beskrevet i foregående kapitel. Nedenfor er kort beskrevet de parametre som afviger fra de forventede.

Husets luftskifte er oprindeligt forventet at være ca. $0,10 \text{ h}^{-1}$. Lufttætheden har dog ikke haft lige så høj prioritet i projekterings- og byggefasen, som for de byggerier hvor BYG.DTU har deltaget aktivt i disse faser, og derfor er det vurderet at luftskiftet nærmere er $0,15 \text{ h}^{-1}$.

Effektiviteten af varmegenvindingen forventedes at være ca. 90 %. De detaljerede målinger viser at bruttoeffektiviteten faktisk har været 91 %, og dette ændres i simuleringsmodellen.

De interne varmetilskud ændres også i simuleringsmodellen således at de afspejler de aktuelt målte forhold, dvs. svarende til en samlet effekt på ca. $3,7 \text{ W/m}^2$ i hele måleperioden.

Inde- og udetemperaturerne samt solpåvirkningen fastsættes også svarende til de målte data, og derefter foretages en simulering svarende til måleperioden.

I tabel 23 er opstillet resultaterne af den detaljerede simulering.

Tabel 23. Beregnet energibalance for perioden 6.03.2003 til 1.04.2003, BSIM 2000.

Energi		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	305
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-152
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-49
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	396
Q_{udst}	Varme tilført fra udstyr	429
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-875
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-54

Energiforbruget til opvarmning er, som tidligere omtalt, målt til 370 kWh, og den detaljerede beregning undervurderer således energiforbruget med ca. 65 kWh.

Sammenlignes resultaterne af den detaljerede beregning med den simple beregning er det tydeligt at den primære forskel ligger i beregningen af transmissionstab. Dette skyldes primært det forhold, at BSIM direkte tager hensyn til konstruktionernes varmekapacitet, mens effekten af varmekapaciteten i den simple metode er indregnet i udnyttelsesfaktoren. Det er derfor svært direkte at sammenligne varmetabet via klimaskærmen. Men også solindfaldet afviger og det skyldes metodeforskelle vedrørende indregning af effekt af nære og eksterne skygger, g-værdiens vinkelafhængighed mm.

Den forholdsvis store forskel mellem det målte og beregnede energiforbrug til opvarmning, kan skyldes flere parametres indflydelse. Men det er dog sandsynligt, at forskellen blot kan tilskrives, at der er regnet med lidt for høje udetemperaturer og lidt for lave indetemperaturer.

Ved de meteorologiske målestationer i Mejrup og Thyborøn, der ligger tæt på Lemvig, er der i måleperioden målt middeltemperaturer på hhv. $4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ og $3,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, hvilket er lidt lavere end de $4,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, der er anvendt i beregningerne. Hvis det antages at udetemperaturen i stedet for de $4,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, har været $4,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, som er middeltemperaturen af målingerne i Mejrup og Thyborøn (alle timeværdier i vejrdatabasen reduceres med $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$), kan der med BSIM beregnes et energiforbrug til opvarmning på 341 kWh. Energiforbruget forøges altså som følge af den lavere udetemperatur fra 305 til 341 kWh, svarende til 12 %.

Som nævnt tidligere, er der en vis usikkerhed forbundet med indetemperaturmålingerne. På baggrund af bl.a. målinger af temperaturen ved indløbet til ventilationsanlæggets varmeveksler, er det ikke usandsynligt at den gennemsnitlige indetemperatur kan have været f.eks. $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ højere, dvs. $21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ frem for de $21,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Med en indetemperatur på $21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kan beregnes et energiforbrug til opvarmning på 350 kWh, svarende til en forøgelse på ca. 15 %. Det ses at opvarmningsbehovet

er meget følsomt overfor blot små ændringer i randbetingelserne, hvilket er typisk for meget velisolerede huse.

Samlet set vil en 0,6 °C lavere udetemperatur kombineret med en 0,5 °C højere indetemperatur resulterer i et beregnet energiforbrug til opvarmning på 380 kWh (396 kWh ved den simple metode), og der er derved stort set overensstemmelse mellem det målte og de beregnede forbrug.

Årsagen til de forskelle der forekommer i de målte og beregnede resultater kan muligvis være at der som opvarmning anvendes gulvvarme. I de målte resultater vil dette ikke spille nogen rolle, idet energiforbruget til opvarmning måles direkte ud fra den leverede fjernvarmeenergi. I de to beregningsmodeller, den simple og den detaljerede, er det dog vanskeligt at tage højde for at der anvendes gulvvarme som opvarmning. I "Numerical Investigation of Floor Heating Systems in Low Energy Houses" [30] er problemstillingen vedrørende dette behandlet, og det konkluderes at man, selv med en god styring af gulvvarmesystemet, vil kunne forvente et opvarmningsbehov som ligger 10 % højere end hvad der ville være tilfældet med et ideelt opvarmningssystem (svarende til det som "benyttes" i den simple beregningsmodel).

Med den generelle usikkerhed taget i betragtning, især ved så lave opvarmningsbehov, som der her er tale om, må det konkluderes at husets varmetekniske ydeevne er som forventet.

Hvis man foretager en detaljeret simulering af opvarmningsbehovet på baggrund af den korrigerede model, får man resultaterne opstillet i tabel 24. Til sammenligning er opstillet den forventede varmebalance beregnet i kapitel 5.

Tabel 24. Beregnet energibalance for hele året [DRY].

Energibalance		Oprindelig model [kWh]	Revideret model [kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	3747	4311
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-867	-1292
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-150	-127
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	1779	1779
Q_{udst}	Varmer tilført fra udstyr	4037	3737*
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-7905	-7888
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	-27	-10
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-669	-511

* inkl. varmetab/-tilskud fra uisolerede varmerør mm. i bryggers.

Det årlige opvarmningsbehov er således ca. 560 kWh højere efter ændringerne i modellen. Den primære forskel er infiltrationstabet, 425 kWh, som skyldes at der i den oprindelige model blev regnet med et luftskifte på 0,10 h⁻¹ og i den reviderede model regnes med 0,15 h⁻¹.

Det korrigerede forventede opvarmningsbehov er således 4311 kWh, hvilket svarer til ca. 38 % af energirammen ifølge gældende Bygningsreglement (BR-95).

For yderligere at analysere forsøgshusets opvarmningsbehov gives i det følgende en kort gennemgang af de målinger som er gennemført siden måleudstyret blev installeret og indtil i dag. For hus B er der foretaget målinger over et helt år. Perioden starter 27.12.2001 og går til

24.12.2002. I tabel 25 er opstillet aflæsninger af det akkumulerede totale energiforbrug, dvs. energiforbrug til opvarmning samt varmt brugsvand.

Tabel 25. Hus B. Målt energiforbrug til opvarmning

Dato	Forbrug [kWh]
27-12-2001	0
07-01-2001	527
30-01-2002	1357
31-01-2002	1387
04-02-2002	1505
05-02-2002	1556
06-02-2002	1575
07-02-2002	1612
08-02-2002	1643
13-02-2002	1768
15-02-2002	1808
18-02-2002	1884
20-02-2002	1984
10-03-2002	2513
13-03-2002	2588
23-04-2002	3479
23-05-2002	3934
23-06-2002	4183
23-07-2002	4327
23-08-2002	4498
23-09-2002	4646
25-10-2002	5437
23-11-2002	6587
05-12-2002	7111
24-12-2002	8197

Hvis man udelukkende betragter fyringssæsonen er det samlede forbrug til opvarmning ca. 7400 kWh. Dette forbrug inkluderer som omtalt også forbruget til varmt brugsvand. For at trække denne del ud af resultatet bestemmes det gennemsnitlige daglige forbrug til varmt brugsvand, og dette fastlægges ud fra det aflæste forbrug for perioden fra 22.08.2003 til 07.10.2003. Det gennemsnitlige forbrug fastlægges på denne baggrund til ca. 5,75 kWh/dag, og dermed kan det totale forbrug til varmt brugsvand for fyringssæsonen fastlægges til ca. 1334 kWh.

Det totale forbrug til rumopvarmning er således ca. 6070 kWh, hvilket er væsentligt højere end de forventede 4300 kWh. Årsagen til dette er primært at de interne varmetilskud er væsentligt lavere end de forventede 5 W/m², og foretager man en simplificeret beregning af hvilken betydning dette har for opvarmningsbehovet, kommer man frem til at man kan forvente et opvarmningsbehov som er ca. 1700 kWh højere end det forventede. Dette svarer meget godt til forskellen på det målte opvarmningsbehov og det forventede opvarmningsbehov jf. BSIM simuleringen.

På denne baggrund konkluderes det at forsøgshus B har et forventet opvarmningsbehov på ca. 4300 kWh, hvilket svarer til ca. 38 % af den nu gældende energiramme.

6.2.3 Hus E. Skalmurede porebetonelementer

I tabel 26 er opstillet måleresultater for hus E.

Tabel 26. Måleresultater for hus E

Målinger påbegyndt	20.12.2002
Målinger afsluttet	15.02.2003
Måleperiode	57 dage
Beboet/ubeboet	Beboet
Målte data	
Udetemperatur	0,1 °C
Totalt solindfald	288 kWh
Indetemperatur	20,2 °C
Effektivitet af varmegenvinder	79 %
Målt energiforbrug til opvarmning	3388 kWh

Huset har været beboet i måleperioden, og derfor er det nødvendigt at foretage en vurdering af hvad det interne varmetilskud har været gennem perioden. El-målinger for forsøgshuset viser at der i gennemsnit har været brugt ca. 15,3 kWh pr. døgn i den pågældende periode, hvilket svarer til et gennemsnitligt forbrug på 637 W, eller 4,79 W/m².

Det har imidlertid vist sig at der i perioden har været problemer med anlægget til opsamling af regnvand, hvilket har medført at den hertil hørende pumpe har været i konstant drift. Oplysninger vedrørende pumpen viser at denne har et gennemsnitligt effektoptag på 200 - 300 W, afhængigt af vandmængden der pumpes. Der har været tale om en relativt lille vandmængde, og derfor antages det at pumpen har brugt 200 W. Herudover har måleopstillingen (varmetråde til at sikre solarimetre mod dugdannelse) brugt 60 W og det vurderes at den udvendige belysning har haft et forbrug på gennemsnitligt 10 W. Herved er der altså ca. 270 W af det samlede forbrug på 637 W der ikke påvirker husets opvarmningsbehov.

Af de resterende 367 W antages det at ca. 150 W er brugt på belysning, og at 100 % af denne effekt bliver omsat til varmetilskud. De resterende 217 W antages at være fra apparatur, og jf. SBI meddelelse 129 kan ca. 70 % af denne energi omsættes til varmetilskud. Herved haves et samlet varmetilskud på 302 W, svarende til ca. 2,3 W/m².

Ved samtale med beboerne i huset er det oplyst at den gennemsnitlige opholdstid har været ca. 12 timer pr. døgn for to voksne personer. Varmaefgivelsen fra en voksen regnes som 100 W, og derfor haves et gennemsnitligt varmetilskud over døgnet fra personer på ca. 100 W i den pågældende periode, svarende til ca. 0,75 W/m².

Det samlede varmetilskud for huset i den pågældende periode er således vurderet til ca. 3,05 W/m², svarende til ca. 400 W.

Infiltrationen er oprindeligt forventet at være 0,10 h⁻¹, men de detaljerede målinger ved trykprøvning og sporgas har vist at luftskiftet er en lidt højere, og derfor anvendes de 0,12 h⁻¹ som disse målinger har vist.

Varmegenvindingens temperaturvirkningsgrad har i perioden gennemsnitligt været 79 %, hvilket er væsentligt lavere end de forventede 90 %. Årsagen til dette er, at den benyttede varmegenvindings-

enhed er placeret opretstående i bryggerset, hvor den prøverapport der forelå på anlægget var foretaget for en tilsvarende enhed der lå ned. Denne lille forskel bevirker altså en reduktion af temperaturvirkningsgraden på ca. 10 %. Efter problemet stod klart blev det undersøgt om der kunne gøres noget for at opnå den forventede effektivitet, men umiddelbart var den eneste mulighed at installere et helt nyt anlæg, og dette ansås for værende for bekosteligt.

Foretager man en simplificeret beregning af det forventede opvarmningsbehov for den pågældende periode, kan dette fastlægges som ca. 3200 kWh. Dette opvarmningsbehov, som er baseret på en total varmetabskoefficient for huset på 148 W/K, er en smule lavere end det målte, og forskellen kunne f.eks. svare til at den reelle totale varmetabskoefficient for huset er 154 W/K i stedet for 148 W/K. I tabel 27 er der opstillet en varmebalance for den simple beregning.

Tabel 27. Beregnet energibalace for perioden 20. December 2002 til 15. Februar 2003, simpel.

Energibalace		[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	3198
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-289
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	0
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	288
Q_{udst}	Varmer tilført fra udstyr	545
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-3311
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	0
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-431

De detaljerede målinger af husets energiforbrug til opvarmning har til formål at underbygge beregningerne af det totale forventede årlige energiforbrug til opvarmning beregnet i foregående kapitel. Som det fremgår af de detaljerede målinger af luftskifte og energiforbrug, er der en række parametre som ikke stemmer overens med de antagelser der blev gjort i forbindelse med simuleringerne beskrevet i foregående kapitel. Nedenfor er kort beskrevet de parametre som afviger fra de forventede.

Husets luftskifte er forventet at være $0,10 \text{ h}^{-1}$. Detaljerede målinger af luftskiftet har vist at dette er en anelse større, og i den reviderede simuleringsmodel af huset fastsættes denne derfor til $0,12 \text{ h}^{-1}$.

Effektiviteten af varmegenvindingen forventedes at være 90 %. De detaljerede målinger viser imidlertid en noget lavere effektivitet på ca. 79 %. Dette ændres ligeledes i simuleringsmodellen.

Med de nævnte parametre ændret gennemføres nu en ny detaljeret beregning af det forventede årlige opvarmningsbehov, baseret på referenceåret DRY. I tabel 28 er resultaterne opstillet, og til sammenligning er vist varmebalancen som den blev beregnet i foregående kapitel.

Tabel 28. Beregnet energibalance for hele året [DRY].

Energibalance		Oprindelig model*	Revideret model
		[kWh]	[kWh]
Q_{opv}	Energiforbrug til opvarmning	5831	6694
Q_{inf}	Nettobidrag ved infiltration	-790	-945
Q_{udl}	Varmetab ved udluftning	-390	-355
Q_{sol}	Energi tilført ved solindfald	2824	2824
Q_{udst}	Varmer tilført fra udstyr	3702	3702
Q_{trans}	Trans. tab via klimaskærm	-10530	-10495
Q_{mix}	Vent. tab til naborum	24	5
Q_{vent}	Vent. tab via ventilationsanlæg	-671	-1431

* som tidligere omtalt stemmer resultaterne i tabellen ikke overens med de beregninger som blev gennemført i forbindelse med den første rapport som udkom for det pågældende projekt, idet de interne varmetilskud blev beregnet forkert i denne sammenhæng.

Det årlige opvarmningsbehov er således ca. 860 kWh højere efter ændringerne i modellen. Den primære forskel er ventilationstab, ca. 760 kWh, som skyldes at der i den oprindelige model blev regnet med 90 % varmegenvinding og i den reviderede model regnes med 79 %.

Det korrigerede forventede opvarmningsbehov er således ca. 6700 kWh, hvilket svarer til ca. 65 % af den nu gældende energiramme jf. Bygningsreglementet (BR-95).

For yderligere at underbygge beregningsmodellen foretages der ligeledes en gennemgang af de målinger som er aflæst gennem en længere periode for forsøgshuset. Den måleperiode som betragtes svarer i dette tilfælde til en hel fyringssæson. Perioden starter d. 17.09.2002 og slutter 06.05.2003. I tabel 29 er opstillet resultaterne af målingerne.

Tabel 29. Måleresultater for hus E

Målinger påbegyndt	17.09.2002
Målinger afsluttet	06.05.2003
Måleperiode	232 dage
Beboet/ubeboet	Beboet
Målte data	
Udetemperatur	3,5 °C
Totalt solindfald	2998 kWh
Indetemperatur	20,7 °C
Effektivitet af varmegenvinder	79 %
Målt energiforbrug til opvarmning	8160 kWh

Sammenlignes disse målinger med beregningerne kan det ses at det totale opvarmningsbehov ligger væsentligt over det forventede. Forskellen mellem DRY-beregningen fra BSIM og målingen er ca. 1460 kWh, og samtidig er der målt et totalt solindfald som er 174 kWh højere end forventet. Den reelle forskel er derfor nærmere ca. 1630 kWh.

Som omtalt tidligere er de interne varmetilskud væsentligt lavere end forventet. I BSIM modellen er der regnet med 5 W/m^2 , svarende til SBI-anvisning 184's forskrifter. Dette svarer til 665 W for hele huset, men som det blev diskuteret tidligere har det interne varmetilskud nærmere været 400 W. For

fyringssæsonen svarer denne forskel til en reduktion af de interne varmetilskud på ca. 1475 kWh, og dette er altså en stor del af forklaringen på hvorfor opvarmningsbehovet har været så relativt højt som målingerne viser. Havde det interne varmetilskud levet op til forventningerne ville opvarmningsbehovet for den betragtede fyringssæson have ligget på ca. 6700 kWh, hvilket svarer til ca. 65 % af den nu gældende energiramme.

Indetemperaturen har, som anført, været 20,7 °C i gennemsnit, og dette stemmer helt overens med den gennemsnitlige temperatur beregnet vha. BSIM. Den gennemsnitlige udetemperatur har været en smule lavere end den gennemsnitlige udetemperatur i DRY. I målingerne har udetemperaturen gennemsnitligt været 3,5 °C mens den i DRY er ca. 3,8 °C. Denne forskel betyder at transmissions-tabet har været ca. 200 kWh højere end det skulle forventes hvis DRY's vejrdato var benyttet.

På denne baggrund konkluderes det at forsøgshus E har et forventet opvarmningsbehov på ca. 6700 kWh, hvilket svarer til ca. 65 % af den nu gældende energiramme.

7 ØKONOMI – NYE VS. TRADITIONELLE LØSNINGER

Formålet med dette kapitel er at vurdere økonomien i de energibesparende tiltag som er anvendt i forsøgshusene, således at der skabes et billede af totaløkonomien i investeringerne. Som reference betragtes tilsvarende traditionelle fuldmurede huse, herefter kaldet referencehuse, med isoleringsniveau svarende til krav i det nu gældende bygningsreglement. De økonomiske vurderinger er baseret på en opgørelse/beregning af merinvesteringer og forventede energimæssige besparelser.

Analyserne er udelukkende gennemført for hus A, B og C. For hus D foreligger der ikke på nuværende tidspunkt opgørelser over økonomien, og derfor er en sammenligning ikke mulig. Hus E indgår ikke som udgangspunkt i samme projekt som de øvrige huse, og derfor er der ikke gennemført de samme analyser for dette hus som for de øvrige. For hus F er byggeriet, som tidligere omtalt, ikke realiseret, og derfor er der ikke skabt et fuldstændigt billede af økonomien i projektet.

7.1 Vurderingsmetode

I beregningerne er anvendt, simpel tilbagebetalingstid og nuværdi som økonomisk målestok/-kriterium. Den simple tilbagebetalingstid er defineret som den samlede investering divideret med den årlige besparelse. Ved investering i energitiltag i bygninger kan det normalt antages, at de årlige besparelser er konstante over bygningsdelens levetid eller ind til større genopretning er påkrævet. Nuværdien (også kaldet Net Present Value) måler den totale værdiforøgelse, som ”projektet” genererer udover den opnåede (valgte) forrentning. Inflationseffekten er medtaget gennem valg af realrente og en konsekvent anvendelse af dagspriser.

Nuværdien over en vis periode afhænger af bygningsdelens levetid og realrenten. Ved bestemmelse af nuværdien opgøres alle omkostninger og besparelser til periodens start med den reelle kalkulationsrente (realrente efter skat). Realrenten kan tilnærmet beregnes som:

$$r_r = r_n \cdot (1 - s) - i_e$$

hvor	r_n	Er den nominelle rente i pct./år
	i_e	Er energiprisens stigningstakst i pct./år
	s	Er beskatningen af renter som decimalbrøk

Realrenten har siden 1990 ligget konstant på mellem 2 og 3 pct./år og derfor vil det være rimeligt at regne med en realrente på 2,5 pct./år. Renteniveau, inflation og energiprisens stigningstakst er normalt sammenkoblede økonomiske størrelser, således at de stiger og falder i samme takt. Den normale sammenkobling kan selvfølgelig blive forrykket, hvis der i bygningsdelens levetid sker væsentlig ændring af afgifts- eller beskatningsforhold, f.eks. på energi.

For anlæg – som bygninger – med levetid over 20 år kan regnes med lineær afskrivning og indregning af restværdi (scrapværdi). For en bygningsdel med en levetid på f.eks. 100 år er det ensbetydende med at 30 % af investeringen regnes afskrevet over en 30 årig periode, og at restværdien er 70 % af investeringen opgjort i nutidigt prisniveau.

7.2 Beregningsforudsætninger

Priser er generelt angivet i år 2002 niveau. Energipriser er inkl. moms og afgifter.

Opvarmning af de danske boliger foregår primært med fjernvarme eller varme fra olie- og naturgasfyr. I fremtiden må det forventes at olie erstattes af mere miljøvenlige brændsler (såsom naturgas). Priser på naturgas er baseret på typiske priser indhentet i september 2002. Individuelle naturgaskedler er typisk kondenserende med en årsnyttevirkning på ca. 100 % i forhold til den nedre brændværdi på 39,6 MJ/m³. Prisen på fjernvarme er baseret på oplysninger fra Danske Fjernvarmeværkers Forening og gældende september 2002. Prisen er et landsgennemsnit vægtet i forhold til de enkelte fjernvarmeværkers salg af varme og er naturligvis ekskl. faste afgifter (som udgør ca. 25 %). Der er altså tale om den gennemsnitlige marginalpris. Denne pris ligger på ca. 0,50 kr./kWh.

Elprisen er baseret på normaltariiffer, hvor elprisen er uafhængig af leveringstidspunktet. Elprisen kan dog variere hen over året. Dette skyldes for det første, at andelen af miljøvenlig el/PP (prioriteret produktion) varierer måned for måned. For det andet skyldes det, at prisen på el, der bliver indkøbt på markedsvilkår, afhænger af prisudviklingen på el-børsen. Der anvendes en skønnet gennemsnitlig elpris (ekskl. abonnement) baseret på markedspris og afgifter i september 2002 samt med hensyntagen til den varierende andel af miljøvenlig el.

I tabel 30 er vist en oversigt over energipriser for boliger.

Tabel 30. Energipriser for boliger afhængig af opvarmningsform.

Opvarmningsform	Energipris [kr./kWh]
Naturgas	0,55
Fjernvarme	0,50
El	1,50

De totaløkonomiske vurderinger foretages over en 30 årig periode. I den forbindelse er prognoser for energipriser og realrente forbundet med store usikkerheder, blandt andet fordi det tidsmæssige perspektiv er så langt. Mht. energipriser er der en klar tendens til at disse vil stige i de kommende år. Det er valgt at betragte tre scenarier mht. energipriser og realrente (se tabel 31). Scenarie 1 svarer omtrent til de nuværende økonomiske forhold. Scenarie 2 svarer til dobbelt så høje energipriser, mens scenarie 3 er en variant af scenarie 2, idet realrenten er reduceret fra 2,5 til 0 % p.a. (et større skattefradrag vil kunne realisere en sådan rente).

Tabel 31. De tre økonomiske scenarier der betragtes.

Scenarie	Elpris [kr/kWh]	Varmepris [kr/kWh]	Realrente [% p.a.]	Beregningsperiode [år]
1	1,5	0,5	2,5	30
2	3,0	1,0	2,5	30
3	3,0	1,0	0	30

Levetiden for klimaskærmens sættes generelt til 100 år, hvilket tilnærmelsesvis vil gælde for isoleringen og det bærende element i klimaskærmen. For ventilationsanlægs vedkommende er

antaget en levetid for aggregatet på 20 år, mens kanalsystemet har en væsentligt længere levetid. Kanalsystemet antages at have samme levetid som klimaskærmen.

7.3 Hus A. Skalmurede porebetonelementer

7.3.1 Hus A. Pris- og energimæssig sammenligning

I tabel 32 er vist en oversigt over forskelle af betydning for de to huses varmetekniske ydeevne.

Tabel 32. Varmetekniske forskelle mellem hus A og et tilsvarende traditionelt muret BR-95 hus.

Bygningsdel	Lavenergihus	Referencehus (fuldmuret)
Ydervægge	200 mm isolering	150 mm isolering
Terrændæk	250 mm isolering	225 mm isolering
Tag/loft	400 mm isolering	300 mm isolering
Vinduesfals	85 mm isolering	60 mm isolering
Fundamentsokkel	To skifter letklinkerblokke med midterisolering	To skifter massive letklinkerblokke
Vinduer/døre	Trævinduer med sprosser Afstandsprofil i komposit	Trævinduer Afstandsprofil i stål
Varmesystem	Gulvvarme	Som i lavenergihus
Ventilation	Mekanisk ventilation med varmegenvinding (90 %) Luftmængde: 60 l/s	Mekanisk udsugning med brugs- vandsvarmepumpe Luftmængde: 60 l/s

Herudover er der foretaget en række ændringer som ikke fremgår af tabellen. Disse er som følger:

- Fjernelse af karnapper, hvilket har reduceret vinduesarealet med ca. 7 m² og gulvarealet med ca. 4 m².
- Tagudhænget er reduceret fra ca. 1 m til ca. 0,6 m, og det er hævet ca. 0,2 m.
- Karmens tykkelse/dybde er øget fra 115 mm til 140 mm for at kunne dække over den forøgede isoleringstykkelse i falsen.
- Der er anvendt vinduer med sprosser af æstetiske grunde. Betydningen af disse for transmissionstabet opvejes af at der er benyttet et bedre afstandsprofil i forøgshuset.

Ventilationsbehovet er beregnet for referencehuset, der har et nettoareal på 118 m² og en rumhøjde på 2,4 m, svarende til et nettovolumen på 283 m³. Bygningsreglementets krav til luftskiftet ved brug af mekanisk ventilation, er for det betragtede hus 216 m³/h (60 l/s) svarende til et luftskifte på ca. 0,8 h⁻¹. Dertil kommer infiltration gennem utætheder i klimaskærmen (luftskiftet udenom ventilationsanlæg). Men dette kan minimeres og regnes derfor ikke at aflaste ventilationsanlægget ift. at opnå den ønskede volumenstrøm.

Kravet ved naturlig ventilation er et samlet luftskifte på mindst 0,5 h⁻¹, svarende til en volumenstrøm på 142 m³/h. Der er altså en forholdsvis stor forskel på de to krav. For bedst muligt at belyse økonomien sammenlignes forsøgs- og referencehuset ved volumenstrømmen svarende til kravet som gælder i forbindelse med mekanisk ventilation.

7.3.2 Hus A. Resultater

Der er lavet et overslag over de samlede merudgifter for de energi- og indeklimamæssige tiltag der er indført i forsøgshuset samt en vurdering af disse udgifter set i forhold til de samlede energibesparelser.

Det skal bemærkes, at de ændringer der er foretaget vedrørende karnapper, udhæng og vinduer (sprosser), på baggrund af oplysninger fra Lind & Risør, skønnes at udgøre en samlet netto-besparelse på i størrelsesordenen 20.000 kr. (ekskl. moms).

De samlede merudgifter er opgjort i tabel 33.

Tabel 33. Forøgelse af anlægsudgifter for forsøgshus sammenlignet med referencehus.

Bygningsdel	Merudgift [kr./m ² / kr./m]	Areal/længde [m ² / m]	Merudgift [kr.]
Loft, isolering	45	114	5130
Ydervæg, isolering	52	78	4056
Terrændæk, isolering	10	116	1160
Terrændæk, singels	≈ 0	-	-
Fundamentsokkel v. væg	76	38	2888
Randfundament	50	38	1900
Afstandsprofil	75	19	1425
Vinduekarm	-	-	5000
Ventilationsanlæg og vv-beholder	-	-	17500
Besparelse ved fjernelse af karnapper, reduceret udhæng mm.	-	-	- 20000
I alt ekskl. moms			19059
I alt inkl. moms			23824

De samlede energimæssige konsekvenser af at foretage en bedre isolering af klimaskærmen og anvende et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding frem for et udsugningsanlæg med brugsvandsvarmepumpe er opgjort i tabel 34 og kan sammenlignes med de forøgede anlægs-udgifter.

Tabel 34. Energiforbrug for reference- og forsøgshus. Facaden ved alrum og stue er antaget sydvendt.

Bidrag til energiforbrug	Energiforbrug forsøgshus [kWh/år]	Energiforbrug referencehus [kWh/år]
Rumopvarmning	4453	12216
Varmt brugsvand	3000	0
Ventilatorer	735	400
Varmpumpe	-	1000

7.3.3 Hus A. Sammenfatning

Der er i tabel 33 beregnet en samlet merudgift for forsøgshuset på knap 24000 kr. På baggrund af oversigten over de energimæssige forhold i de to huse i tabel 34 og med energipriser svarende til dagens niveau (scenarie 1), vil energibesparelsen i forsøgshuset svarer til 3379 kr. årligt. Dette giver en meget kort tilbagebetalingstid på 7 år. Med priser svarende til scenarie 2 og 3 vil besparelsen være det dobbelte og tilbagebetalingstiden den halve. Det fremgår at de isoleringsmæssige tiltag og brug af mekanisk ventilation med varmegenvinding samt ændringer vedr. karnapper og tagudhæng har reduceret opvarmningsbehovet med ca. 63 %, hvilket er betydeligt.

Det skal bemærkes at der i ovenstående samlede energimæssige og økonomiske betragtninger er set bort fra herlighedsværdien af at have karnapper og derved fire ekstra m². Det samme gælder det forhold at nogle vil mene at et kraftigt udhæng bidrager positivt til det arkitektoniske udtryk. Fjernelse af karnapper og et mere velbalanceret udhæng medfører et bedre termisk indeklima og til dels bedre visuelt indeklima (mere lys i børne-, sove- og arbejdsværelser), hvilket man samlet set kan påstå vil opveje de ovennævnte negative aspekter. I givet fald er der i forsøgshuset tale om en både billigere og bedre løsning.

Den samlede byggeudgift er ca. 1,3 mio. kr., og derfor er merudgiften til forsøgshuset meget begrænset (få procent). Beregningerne viser at det er muligt for en forholdsvis lille merudgift at foretage væsentlige varmetekniske forbedringer og dermed fremtidssikre et hus energimæssigt.

7.4 Hus B. Lette ydervægselementer i stålskelet

7.4.1 Hus B. Pris- og energimæssig sammenligning

I tabel 35 er vist en oversigt over forskelle af betydning for de to huses varmetekniske ydeevne.

Tabel 35. Varmetekniske forskelle mellem hus B og et tilsvarende traditionelt muret BR-95 hus.

Bygningsdel	Lavenergihus	Referencehus (fuldmuret)
Ydervægge	400 mm mineraluld	125 mm mineraluld
Terrændæk	400 mm EPS	225 mm EPS
Tag/loft	450 mm mineraluld	250 mm mineraluld
Vinduesfals	Kombineret krydsfiner- og gipslysninger med kuldebroafbrydelse	Ommuring med en hel sten (230 mm) - 10 mm kuldebroafbrydelse
Fundamentssokkel	Højisoleret fundamentssystem	To skifter massive letklinkerblokke
Vinduer/døre	Alu-beklædte trævinduer/-døre U = 1.49 W/m ² K Afstandsprofil i aluminium	Som i lavenergihus
Varmesystem	Gulvvarme	Som i lavenergihus
Ventilation	Mekanisk ventilation med varmegenvinding (90 %) Luftmængde: 60 l/s	Naturlig ventilation Luftmængde: 60 l/s

Der er foretaget en beregning af rumopvarmningsbehovet for referencehuset. De mest betydende kuldebroer er ligesom for lavenergihuset medtaget i beregningerne, og samme forudsætninger vedr. orientering, internt varmetilskud, infiltration, udluftning mm. er anvendt. Det indvendige areal er fastholdt, hvilket betyder at bruttoarealet er reduceret fra 145 til 137 m².

Af hensyn til at kunne foretage en fair sammenligning af de to huse, er der regnet med det samme luftskifte for referencehuset som for lavenergihuset, svarende til et samlet luftskifte på $0,85 \text{ h}^{-1}$.

Referencehuset opfylder den nugældende energiramme, under forudsætning af et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ (bygningsreglementets krav ved naturlig ventilation). Opvarmningsbehovet ved dette luftskifte er ca. 10500 kWh, og da den nuværende energiramme er $280 \text{ MJ/m}^2 = 10656 \text{ kWh}$, opfylder referencehuset altså energirammen.

Tabel 36. Resultater vedrørende simulering af opvarmningsbehov.

Varmebalance (bidrag i kWh pr. år)		Lavenergihus	Referencehus
Q_{Opv}	Energiforbrug til rumopvarmning	3747	13490
Q_{Inf}	Nettobidrag ved infiltration	-867	-7256
Q_{Udl}	Varmetab ved udluftning ($>24^\circ\text{C}$)	-150	-3
Q_{Sol}	Energi tilført ved solindfald	1779	1817
Q_{Intern}	Varme tilført fra personer & udstyr	4037	3825
$Q_{\text{Transm.}}$	Transmissionstab via klimaskærmen	-7905*	-11873*
Q_{Mix}	Ventilationstab til naborum	27	0
Q_{Vent}	Ventilationstab via ventilationsanlæg	-669	0
I alt		0	0

* Heraf vinduer: -3701

Det ses af tabel 36 at opvarmningsbehovet for det aktuelle lavenergihus er væsentligt reduceret ift. referencehuset. En stor del af besparelsen skyldes varmegenvindingen i ventilationsanlægget, som dog forbruger en del el til lufttransport. Målinger af elforbruget viser at dette udgør ca. 120 W ved en volumenstrøm på 60 l/s, svarende til ca. 1050 kWh årligt ved konstant drift hele året.

Det har naturligvis krævet en merinvestering at opnå besparelserne. Firmaet der har opført huset, har lavet et overslag over denne merudgift. De samlede energibesparelser og merinvesteringer er opstillet i hhv. tabel 37 og tabel 38.

Tabel 37. Overordnede energimæssige konsekvenser – lavenergihus vs. referencehus.

	Energibesparelse [KWh/år]
Tiltag vedrørende klimaskærmen	4219
Mekanisk ventilation med VGV	5524
El-forbrug i ventilationsanlæg	-1050
Alle tiltag	9743

Drift af et ventilationsanlæg kræver vedligeholdelse. I den forbindelse er der primært tale om udskiftning af filtre. Firmaet der har leveret anlægget oplyser at filtrene skal skiftes én gang årligt og at ét standard filter (type EU6) koster 125 kr. inkl. moms. Derudover regnes der ikke med udgifter til vedligeholdelse eller service. Anlægget indeholder to filtre, og den årlige vedligeholdelsesudgift bliver derfor 250 kr.

Ved sammenligning af naturlig ventilation og mekanisk ventilation skal der foretages fradrag for vægventiler og aftrækskanaler, der er nødvendige for at den naturlige ventilation kan etableres. Et

stort typehusfirma oplyser at der omtrentlig kan regnes med en udgift til vægventiler på 1000 kr. og 4000 kr. til aftrækskanaler (inkl. arbejds løn, men ekskl. moms).

Tabel 38. Samlede merinvesteringer og levetider – lavenergihus vs. referencehus.

	Merinvestering [Tusinde kr.]	Levetid [år]
Tiltag vedr. klimaskærm	38,8	100
Ventilationsanlæg ekskl. kanaler mm.	14,0	20
Kanaler mm.	18,0	100
Fradrag for vægventiler	-1,0	20
Fradrag for aftrækskanaler	-4,0	100
I alt ekskl. moms	65,8	
I alt inkl. moms	82,3	

7.4.2 Hus B. Resultater

Der giver kun mening at beregne simpel tilbagebetalingstid for tiltag, hvor de indgående delelementer har samme levetid. Derfor er der kun foretaget en sådan beregning for tiltaget vedrørende forbedret isolering af klimaskærmen. For at fastlægge besparelsen ved dette tiltag, er der foretaget en sammenligning af opvarmningsbehovet for lavenergihuset med naturlig ventilation og referencehuset med naturlig ventilation. Forskellen i opvarmningsbehovet er 4219 kWh/år. Herefter kan tilbagebetalingstiden bestemmes for scenarie 1 (for scenarie 2 og 3 halveres tilbagebetalingstiden):

$$\text{Tilbagebetalingstid i år: } \frac{48500kr}{4219kWh / \text{år} \cdot 0,50kr. / kWh} = 23$$

I tabel 39 ses resultater med hensyn til nuværdi-beregninger.

Tabel 39. Totaløkonomisk besparelse over 30 år udtrykt som nuværdi.

Tiltag i lavenergihus	Besparelse over 30 år [tusinde kr.]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Forbedret isolering af klimaskærm*	11,8	56,0	111,9
Mekanisk ventilation med VGV	-14,3	10,5	34,1
Alle tiltag i huset	-2,5	66,5	146,0

*Bedre isolering af loft, ydervægge, terrændæk og fundament

Af tabel 39 fremgår det den forbedrede isolering af klimaskærmen for alle tre scenarier resulterer i en besparelse set over 30 år.

Det fremgår også at den mekaniske ventilation med varmegenvinding giver anledning til en merudgift ved scenarie 1, der svarer til de økonomiske forhold i dag (for scenarie 2 og 3 er der tale om besparelser over de 30 år). Resultatet er ikke overraskende, da drift- og vedligeholdelsesomkostningerne (elforbrug og filtre) er relativt store for det aktuelle anlæg.

Skift af filtre er nødvendigt for at sikre et lavt tryktab/elforbrug, idet filtre bidrager til en stor del af det samlede tryktab. Denne omkostning kan altså ikke reduceres. Tidligere i denne rapport er nævnt at elforbruget kan nedbringes med ca. 50 % ved brug af mere energieffektive komponenter samt ved fokus på en energieffektiv udformning af kanalsystem mm. Der er nedenfor foretaget en

beregninger af nuværdien i en situation hvor elforbruget er reduceret med 50 % og hvor anlægsinvesteringen er forøget med 4500 kr. inkl. moms (omtrentlig merpris for ventilatorer drevet af DC-motorer med bedre el-virkningsgrad end AC-motorer). Det er altså ikke antaget af den energieffektive udformning af kanalsystem mm. koster ekstra i forhold til normal praksis.

Som det kan ses af tabel 40 forbedres totaløkonomien væsentligt ved en reduktion af elforbruget med 50 %. Det ses også at der nu stort set er tale om en neutral investering (nuværdi = 0) ved scenarie 1.

Tabel 40. Besparelse over 30 år for mekanisk ventilationsanlæg med et elforbrug som er reduceret fra 120 W til 60 W.

	Besparelse over 30 år [tusinde kr.]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Mekanisk ventilation med VGV	-4,0	37,3	74,6

7.4.3 Hus B. Sammenfatning

Beregningerne viser således at totaløkonomien i forsøgshus B svarer til totaløkonomien i et traditionelt fuldmuret hus opført efter energikravene i det nuværende bygningsreglement, hvis der antages økonomiske forhold som i dag (scenarie 1). Eller sagt med andre ord så koster det det samme totaløkonomisk set at opvarme lavenergihuset og det traditionelle hus.

Beregningerne indikerer også at man kan spare mange penge på at spare på energien, hvis energiprisen, som forventet, stiger i fremtiden.

Ud fra beregningerne kan konkluderes at investeringen i et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding, hvor elforbruget er reduceret mest muligt, totaløkonomisk set er hensigtsmæssigt. Udover det rent økonomiske er der en række fordele forbundet med at have mekaniske ventilation med varmegenvinding, idet indeklimaet alt andet lige forbedres. Der er mulighed for behovsstyring, luften bliver filtreret og friskluften forvarmet inde den blæses ind i boligen, hvilket betyder at træk ikke vil være et problem med dagens effektive varmevekslere. Desuden vil risikoen for skimmelsvamp være mindsket betydeligt.

Den samlede merudgift for lavenergihuset er opgjort til 82300 kr., hvor referencen er et traditionelt muret hus med naturlig ventilation. For dette beløb har det været muligt at reducere rumopvarmningsbehovet svarende til et niveau på 33 % af den nugældende energiramme. Den samlede byggeudgift er opgjort til ca. 1,3 mio. kr., hvilket betyder at merudgiften svarer til ca. 6 %. Det er således muligt for en forholdsvis lille merudgift at fremtidssikre et hus energimæssigt.

7.5 Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet

For hus C er det valgt at betragte en situation svarende til at der er installeret mekanisk ventilation med varmegenvinding i huset. Hvis ikke et sådant anlæg installeres vil huset ikke kunne leve op til fremtidens energiramme, og vil som sådan heller ikke kunne karakteriseres som lavenergihus.

7.5.1 Hus C. Pris- og energimæssig sammenligning

I tabel 41 er vist en oversigt over de forskelle der er mellem de to huse. I tabellen er udelukkende medtaget de forskelle som har en betydning for opvarmningsbehovet. Som det fremgår af tabellen

er der kun meget små ændringer i isoleringstykkelserne, idet lavenergihusets konstruktioner ca. svarer til kravene i Bygningsreglementet.

Tabel 41. Varmetekniske forskelle mellem lavenergihuset og referencehuset.

Bygningsdel	Lavenergihus	Referencehus
Ydervægge	220 mm mineraluld	200 mm mineraluld
Skunkvægge	250 mm mineraluld	Som i lavenergihus
Skråvægge	220 mm mineraluld	Som i lavenergihus
Terrændæk	225 mm EPS	210 mm EPS
Tag/loft	300 mm mineraluld	245 mm mineraluld
Vinduesfals	Fibergipslysninger med kuldebroafbrydelse	Som i lavenergihus
Fundaments sokkel	~ 1½ skifte isolerede letklinkerblokke	Som i lavenergihus
Vinduer/døre	Trævinduer/-døre $U = 1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ Afstandsprofil i aluminium	Som i lavenergihus
Varmesystem	Gulvvarme + radiatorvarme	Som i lavenergihus
Ventilation	Mekanisk ventilation med varmegenvinding (90%) Luftmængde: 60 l/s ($0,77 \text{ h}^{-1}$)	Naturlig ventilation Luftskifte: $0,5 \text{ h}^{-1}$ (39 l/s)

Der er foretaget en beregning af rumopvarmningsbehovet for referencehuset. De mest betydende kuldebroer er ligesom for lavenergihuset medtaget i beregningerne, og samme forudsætninger vedr. orientering, internt varmetilskud, infiltration, udluftning mm. er anvendt. Det indvendige areal er fastholdt, dvs. at bruttoarealet er reduceret fra ca. 163 til ca. 161 m^2 .

Af hensyn til at kunne foretage en fair sammenligning af de to huse, er der regnet med det samme luftskifte for referencehuset som for lavenergihuset.

Referencehuset opfylder den nugældende energiramme, under forudsætning af et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ (bygningsreglementets krav ved naturlig ventilation). Opvarmningsbehovet ved dette luftskifte er ca. 11208 kWh, og da den nuværende energiramme er $280 \text{ MJ/m}^2 = 12289 \text{ kWh}$, opfylder referencehuset altså energirammen.

I lavenergihuset med varmegenvinding, vil det samlede luftskifte være væsentligt højere end de $0,5 \text{ h}^{-1}$ der benyttes i referencehuset. Dette forhold har en meget stor betydning for de økonomiske vurderinger og giver et forvrænget billede af de reelle besparelser der opnås ved indførslen af mekanisk ventilation med varmegenvinding. Derfor gennemføres beregningerne således at luftskiftet i referencehuset fastsættes til samme niveau som for lavenergihuset, dvs. $0,77 \text{ h}^{-1}$. Årsagen til at denne forskel overhovedet forekommer er reglerne angivet i det nu gældende Bygningsreglement, hvor man ved naturlig ventilation kræver et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ mens man ved mekanisk ventilation kræver udluftning på 20 l/s for køkken, 15 l/s for bryggers og 10 l/s for badeværelser.

I tabel 42 er resultaterne af beregningerne opstillet til sammenligning.

Tabel 42. Resultater vedrørende simulering af opvarmningsbehov.

Varmebalance (bidrag i kWh pr. år)		Lavenergi	Reference
Q _{Opv}	Energiforbrug til rumopvarmning	5084	11710
Q _{Inf}	Nettobidrag ved infiltration	-1025	-7678
Q _{Udl}	Varmetab ved udluftning (>24 °C)	-80	-148
Q _{Sol}	Energi tilført ved solindfald	3112	3142
Q _{Intern}	Varme tilført fra personer & udstyr	4543	4543
Q _{Trans}	Transmissionstab via klimaskærmen*	-11526	-11572
Q _{Mix}	Ventilationstab til naborum	219	0
Q _{Vent}	Ventilationstab via ventilationsanlæg	-328	0
I alt		0	0

* Heraf vinduer: -6058

Det ses af tabel 42 at opvarmningsbehovet for det aktuelle lavenergihus er væsentligt reduceret ift. referencehuset. Størstedelen af besparelsen skyldes varmegenvindingen i ventilationsanlægget, som dog forbruger en del el til lufttransport. Målinger af elforbruget viser at dette udgør ca. 66 W ved en volumenstrøm på 60 l/s, svarende til ca. 578 kWh årligt ved konstant drift hele året.

Det har naturligvis krævet en merinvestering at opnå besparelserne. Firmaet der har opført huset, har lavet et overslag over denne merudgift. De samlede energibesparelser og merinvesteringer er opstillet i hhv. tabel 43 og 44.

Tabel 43. Overordnede energimæssige konsekvenser – lavenergihus vs. referencehus.

	Energibesparelse [kWh/år]
Tiltag vedrørende klimaskærmen	46
Mekanisk ventilation med VGV	6580
El-forbrug i ventilationsanlæg	-578
Alle tiltag	6048

Det er af tabel 43 tydeligt at tiltagene vedrørende klimaskærmen kun udgør en meget lille del af den samlede besparelse. I denne forbindelse skal det dog nævnes at den beregnede besparelse er påvirket af at der samtidig indføres mekanisk ventilation med varmegenvinding, idet indetemperaturene herved påvirkes væsentligt. Den omtrentlige besparelse ved at gennemføre ændringerne vedrørende klimaskærmen alene, kan på baggrund af ændringen i varmetabskoefficienterne bestemmes til ca. 250 kWh/år.

Drift af et ventilationsanlæg kræver vedligeholdelse. I den forbindelse er der primært tale om udskiftning af filtre. Typisk skal disse skiftes én gang årligt, og et standard filter (type EU6) koster 125 kr. inkl. moms. Derudover regnes der ikke med udgifter til vedligeholdelse eller service. Anlægget indeholder to filtre, og den årlige vedligeholdelsesudgift bliver så 250 kr.

Ved sammenligning af naturlig ventilation og mekanisk ventilation skal der foretages fradrag for vægventiler og aftrækskanaler, der er nødvendige for at den naturlige ventilation kan etableres. Et stort typehusfirma oplyser at der omtrentlig kan regnes med en udgift til vægventiler på 1000 kr. og 4000 kr. til aftrækskanaler (inkl. arbejds løn, men ekskl. moms).

Tabel 44. Samlede merinvesteringer og levetider – lavenergihus vs. referencehus.

	Merinvestering [Tusinde kr.]	Levetid [år]
Tiltag vedr. klimaskærm	3,0	100
Ventilationsanlæg ekskl. kanaler mm.	20,5	20
Kanaler mm.	26,3	100
Fradrag for vægventiler	-1,0	20
Fradrag for aftrækskanaler	-4,0	100
I alt ekskl. moms	44,8	
I alt inkl. moms	56,0	

7.5.2 Hus C. Resultater

Der giver kun mening at beregne simpel tilbagebetalingstid for tiltag, hvor de indgående delelementer har samme levetid. Derfor er der kun foretaget en sådan beregning for tiltaget vedrørende forbedret isolering af klimaskærmen. For at fastlægge besparelsen ved dette tiltag, er der foretaget en sammenligning af opvarmningsbehovet for lavenergihuset med naturlig ventilation og referencehuset med naturlig ventilation. Forskellen i opvarmningsbehovet er 2200 kWh/år. Herefter kan tilbagebetalingstiden bestemmes for scenarie 1 (for scenarie 2 og 3 halveres tilbagebetalingstiden). I tabel 45 og 46 er opstillet resultater for nuværdiberegninger.

Tilbagebetalingstid i år: $\frac{3000kr}{46kWh / \text{år} \cdot 0,50kr. / kWh} = 130$, i forhold til reference 2.

Tabel 45. Totaløkonomisk besparelse over 30 år udtrykt som nuværdi, reference 2.

Tiltag i lavenergihus	Besparelse over 30 år [tusinde kr.]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Forbedret isolering af klimaskærm*	-1,5	-1,0	0,5
Mekanisk ventilation med VGV	11,1	61,8	111,7
Alle tiltag i huset	9,6	60,8	112,2

*Bedre isolering af loft, ydervægge, terrændæk og fundament

Af tabel 45 fremgår det at den forbedrede isolering af klimaskærmen kun resulterer i en besparelse set over 30 år for scenarie 3.

Af tabel 45 fremgår det endvidere at indføringen af mekanisk ventilation med varmegenvinding er en rigtig god investering uanset hvilket scenarie der betragtes. For scenarie 1 vil denne foranstaltning medføre en besparelse over 30 år på ca. 11.000 kr.

7.5.3 Hus C. Sammenfatning

Beregningerne udført i dette afsnit viser at de energibesparende foranstaltninger som er indført i det aktuelle lavenergihus giver en besparelse på ca. 10.000 kr. over 30 år for situationen svarende til scenarie 1, se tabel 45.

Hvis de økonomiske forhold ændrer sig svarende til scenarie 2 eller 3, vil den mekaniske ventilation med varmegenvinding medføre besparelser over 30 år uanset hvordan man vælger at se på det. Sammenlignes med referencehus 2, bliver disse besparelser hhv. ca. 61.000 kr. og 112.000 kr.

Ud fra beregningerne kan det således konkluderes at investeringen i et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding er rentabel når der benyttes et reelt sammenligningsgrundlag, og hvis energipriserne udvikler sig negativt vil dette tiltag endog være særdeles rentabelt.

Udover det rent økonomiske er der en række fordele forbundet med at have mekaniske ventilation med varmegenvinding, idet indeklimaet alt andet lige forbedres. Der er mulighed for behovsstyring, luften bliver filtreret og friskluften forvarmet inden den blæses ind i boligen, hvilket betyder at træk ikke vil være et problem med dagens effektive varmevekslere. Desuden vil risikoen for skimmelsvamp være mindsket betydeligt.

Den samlede merudgift for lavenergihuset er opgjort til 56.000 kr. (se tabel 44), hvor referencen er et tilsvarende hus med naturlig ventilation. For dette beløb har det været muligt at reducere rumopvarmningsbehovet svarende til et niveau på ca. 50 % af den nugældende energiramme. Den samlede byggeudgift er opgjort til ca. 1,3 mio. kr., hvilket betyder at merudgiften svarer til ca. 4,3 %. Det er således muligt for en forholdsvis lille merudgift at fremtidssikre et hus energimæssigt.

8 SAMMENFATNING

Denne rapport har beskrevet seks forskellige forsøgshuse med opvarmningsbehov svarende til den forventede skærpede energiramme i Bygningsreglementet 2005. Forsøgshusene repræsenterer de mest almindeligt anvendte byggesystemer som benyttes i forbindelse med én-familiehuse i Danmark i dag.

Rapporten har indledningsvis givet en detaljeret beskrivelse af forsøgshusenes generelle opbygning, klimaskærmskonstruktioner og installationer, og baggrunden for de valg der er foretaget gennem projekteringsfasen er diskuteret.

Der er opstillet resultater af detaljerede beregninger af forsøgshusenes varmetransmissionskoefficienter, dimensionerende varmetab, og bruttoenergirammer samt forsøgshusenes forventede opvarmningsbehov og indeklimamæssige forhold.

Herefter er gennemgået detaljerede målinger af forsøgshusenes luftskifte, opvarmningsbehov og indeklima, og resultaterne af disse målinger er sammenlignet med de forventninger føromtalt beregninger havde stillet i udsigt.

Til sidst er forsøgshusenes økonomi belyst, således at de forskellige energibesparende tiltag som er benyttet, vurderes i forhold til de ekstra omkostninger de indebærer.

8.1 Beregnede energimæssige forhold

Samtlige seks forsøgshuse opfylder de nu gældende U- og ψ -værdi krav specificeret i BR-95. Hus A, B, D og F lever endvidere op til de forventede skærpede krav i BR-2005. For hus C og E er det primært vinduernes U-værdier som er væsentligt højere end de forventede skærpede krav, og da man uden videre vil kunne udskifte disse med andre vinduer med lavere U-værdier, vil det altså ikke være noget problem at få disse huse på niveau med de øvrige.

Hus A, B, D, E og F lever op til gældende og forventede skærpede krav til varmetabsrammen. Hus C og F lever ikke op til de forventede skærpede krav, og den primære årsag til dette er at U-værdierne for hhv. ydervæg og vinduer er relativt høje. Med f.eks. bedre vinduer, svarende til de som er benyttet i f.eks. hus A, ville den skærpede varmetabsramme kunne overholdes uden problemer. Af det samlede transmissionstab for husene, udgør kuldebroerne mellem 16 – 27 %.

Forsøgshusenes forventede opvarmningsbehov ligger fra 26 – 40 kWh/m², svarende til 33 – 51 % af den nugældende energiramme. For hus C er der i denne sammenhæng taget udgangspunkt i en situation hvor den naturlige ventilation erstattes af mekanisk ventilation med varmegenvinding. Projektets formål var at opnå en reduktion på mindst 33 % i forhold til gældende energiramme, og dette formål er opfyldt hvis forsøgshusene i praksis lever op til disse forventninger.

Der er foretaget en beregning af bruttoenergirammen for hvert af de seks forsøgshuse. Disse beregninger viser at hus A, B, D og F lever op til kravene. For hus C konkluderes det at den naturlige ventilation skal udskiftes med mekanisk ventilation med varmegenvinding og el-besparende ventilatorer for at kravene kan efterleves. For hus E konkluderes det, at ventilationsanlæggets el-effektivitet skal forbedres, f.eks. ved udskiftning af motorer til et mere el-besparende alternativ, og at der skal benyttes bedre vinduer i forsøgshuset for at kravene kan efterleves.

Vurderinger af forsøgshusenes indeklima, baseret på detaljerede beregninger vha. BSIM, er foretaget for hus A, B, C og D. Disse analyser har vist at der, jf. DS474, ikke vil være problemer med indeklimaet, på trods af at der er tale om velisolerede huse. I analyserne er det antaget at der udluftes ved indetemperaturer over 24 °C, hvilket oftest vil forekomme på tidspunkter hvor der ikke er beboere til stede. Derfor må det i den enkelte situation overvejes om der eventuelt er behov for mekanisk styring af udluftningen. Analyserne viser endvidere at der kun er ganske små forskelle i indeklimaet for de tunge og lette byggerier.

Fordelen ved at benytte tunge byggesystemer er, at man kan udnytte den interne varmekapacitet af bygningen til at udligne store udsving i indetemperaturen, således at man undgår situationer med meget høje indetemperaturer. Dette kunne f.eks. udnyttes ved ventilation, og dermed køling, af bygningen om natten, hvilket vil resultere i en generelt lavere temperatur i dagtimerne. Ulempen er så, at hvis huset først er blevet varmt, kan det være vanskeligt at slippe af med varmen igen.

Fordelen ved at benytte de lette byggesystemer er, at man hurtigt kan slippe af med eventuelle overtemperaturer ved at lufte ud. Ulempen er, at man ikke kan oplagre varme i konstruktionerne, og derfor vil der kunne blive meget varmt i situationer med kraftigt solindfald.

8.2 Målinger af opvarmningsbehov og lufttæthed

Der er foretaget detaljerede målinger af luftskiftet for forsøgshus A, C og E. Disse målinger, dvs. trykprøvninger og sporgasmålinger, har vist at der for hus A og E, hvor lufttætheden af klimaskærmen har haft særlig opmærksomhed, både i projekterings- og byggefase, er opnået en høj grad af lufttæthed. For hus C, hvor der er naturlig ventilation og lufttætheden således ikke har været i fokus, er lufttætheden noget lavere, men stadig indenfor fornuftige rammer. Generelt har der i projektet været stilet efter at opnå en lufttæthed således at infiltrationen var højst 0,10 h⁻¹, og målingerne for hus A og E viser at den ligger på hhv. 0,11 h⁻¹ og 0,12 h⁻¹ for disse huse. For hus C er målt en infiltration på 0,17 h⁻¹.

Der er foretaget detaljerede målinger af opvarmningsbehovet for hus A, B og E. Ud fra de detaljerede målinger konkluderes det at forsøgshusene generelt opfører sig som forventet, dvs. i overensstemmelse med de detaljerede simuleringsmodeller. I denne forbindelse er der naturligvis taget udgangspunkt i, at f.eks. infiltrationen og temperaturvirkningsgraden af varmegenvindingen, har været noget hhv. højere og lavere end forventet. På baggrund af de korrigerede beregningsmodeller gennemføres nye simuleringer af bygningerne, og det korrigerede forventede opvarmningsbehov fastlægges.

Efter korrektion af beregningsmodellerne er det tydeligt at der er en rigtigt god overensstemmelse mellem de beregnede opvarmningsbehov og de målte opvarmningsbehov. Det må således konkluderes at de benyttede beregningsværktøjer er særdeles effektive i forbindelse vurderinger af opvarmningsbehovet.

De detaljerede målinger af opvarmningsbehovet for forsøgshusene har endvidere vist, at der generelt er et relativt lavt internt varmetilskud, som ikke svarer til de 5 W/m² som typisk anvendes i vurderingerne. Dette har en meget stor betydning for opvarmningsbehovet i huset, og derfor vil det være oplagt at kigge nærmere på disse forhold i forbindelse med udarbejdelsen af et nyt Bygningsreglement.

Konklusionen er, at forsøgshusenes opvarmningsbehov ligger en smule højere end oprindeligt forventet, men at samtlige huse fortsat lever op til projektets formål om et opvarmningsbehov som er reduceret mindst 33 % i forhold til nu gældende energiramme.

8.3 Økonomi – Nye vs. traditionelle løsninger

Der er foretaget en økonomisk sammenligning mellem forsøgshusene og tilsvarende typiske fuldmurede referencehuse med naturlig ventilation som lige netop opfylder kravene i BR-95. Generelt viser beregningerne at totaløkonomien set over 30 år er omtrent den samme for forsøgshusene og referencehusene, hvis de økonomiske forhold forbliver som i dag. Udvikler de økonomiske forhold sig i retning af højere energipriser, hvilket man må forvente, vil de investeringer der er foretaget i energibesparende tiltag i forsøgshusene hurtigt være rentable.

Generelt viser analyserne at der er god økonomi i isoleringsmæssige tiltag, idet de beregnede tilbagebetalingstider typisk er kortere end 30 år. Økonomien i mekaniske ventilationsanlæg med varmegenvinding afhænger i meget høj grad af om der benyttes el-besparende ventilatorer eller ej. Hvis der ikke benyttes el-besparende ventilatorer er økonomien i anlægget generelt ikke god. Benytter man derimod de el-effektive ventilatorer og i øvrigt sørger for en hensigtsmæssig udformning af kanalsystem mm. ser økonomien væsentligt bedre ud. Herudover skal det nævnes, at der er en række yderligere fordele forbundet med mekanisk ventilation med varmegenvinding sammenlignet med naturlig ventilation, og som er svære at kapitalisere, herunder mulighed for behovsstyring, forvarmet friskluft, filtrering af luften og mindsket risiko for skimmelsvamp.

Den totale merudgift for de energibesparende tiltag i forsøgshusene, ligger på mellem 2 – 6 % af de samlede byggeudgifter som typisk er omkring 1,3 mio. kr.

8.4 Konklusion

Nærværende rapport har beskrevet 6 forsøgshuse som alle lever op til de forventede skærpede krav til energirammen i BR-2005. Forsøgshusene dækker de mest almindeligt anvendte byggesystemer som benyttes i forbindelse med nybyggeri af én-familiehuse i Danmark, og beskrivelser og tegninger af husene givet i nærværende rapport viser at der er tale om arkitektonisk traditionelle løsninger.

Det er dokumenteret gennem detaljerede beregninger og målinger at forsøgshusene lever op til de forventede skærpede krav. Det er ligeledes dokumenteret at indeklimaet ikke kompromitteres som følge af den forøgede isoleringsgrad, lufttæthed og anvendelse af mekanisk ventilation med varmegenvinding.

De økonomiske forhold vedrørende forsøgsbygningerne er belyst, og der er gjort rede for de meromkostninger som de energibesparende tiltag medfører. Meromkostningerne er sat i relation til energibesparelserne, og generelt viser disse sammenligninger at der er en god økonomi i investeringerne.

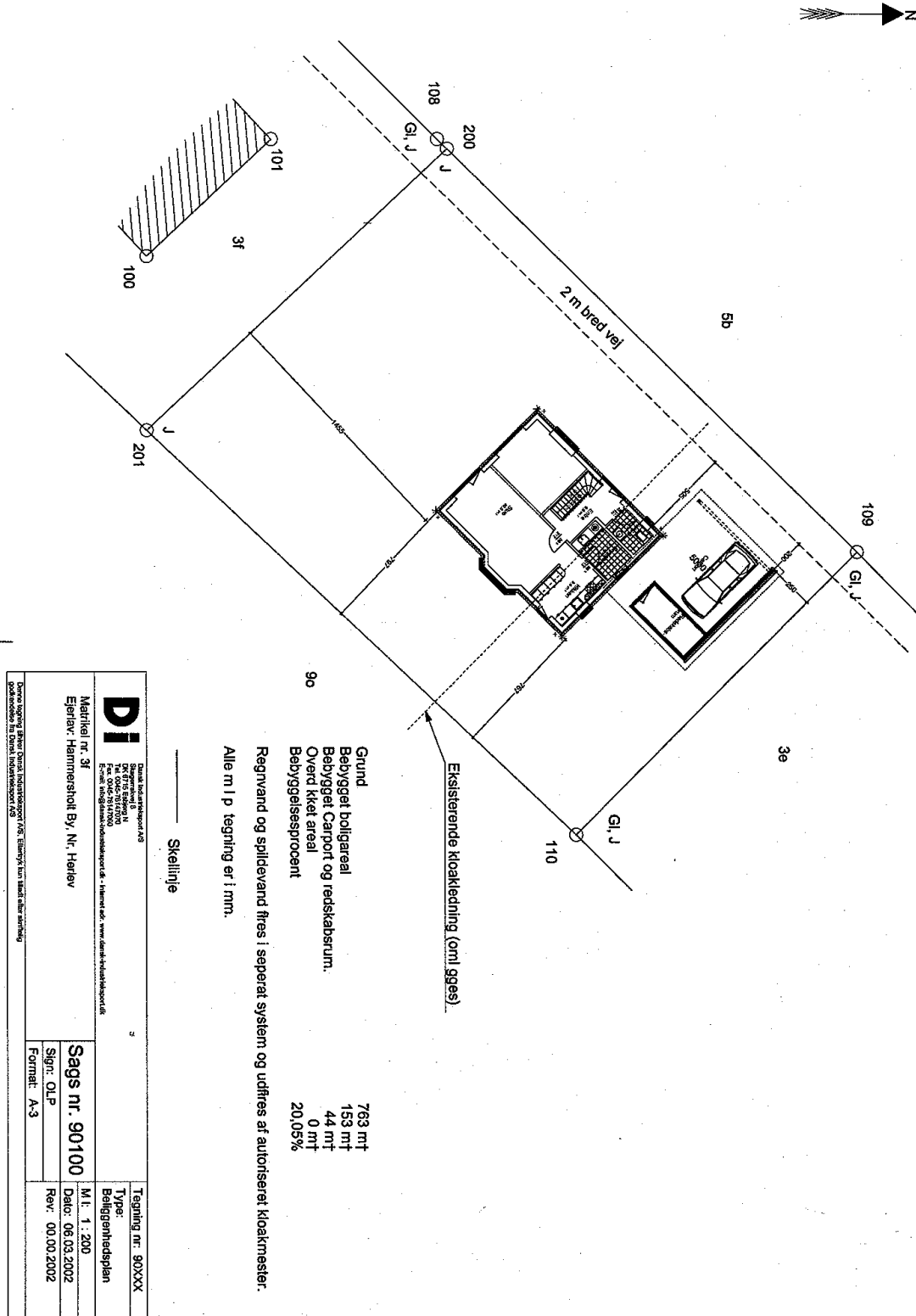
Det kan altså sammenfattende konkluderes, at det er muligt at reducere opvarmningsbehovet i typiske én-familiehuse med 33 % eller mere, uden at dette har væsentlige arkitektoniske, byggetekniske eller økonomiske konsekvenser.

9 REFERENCER

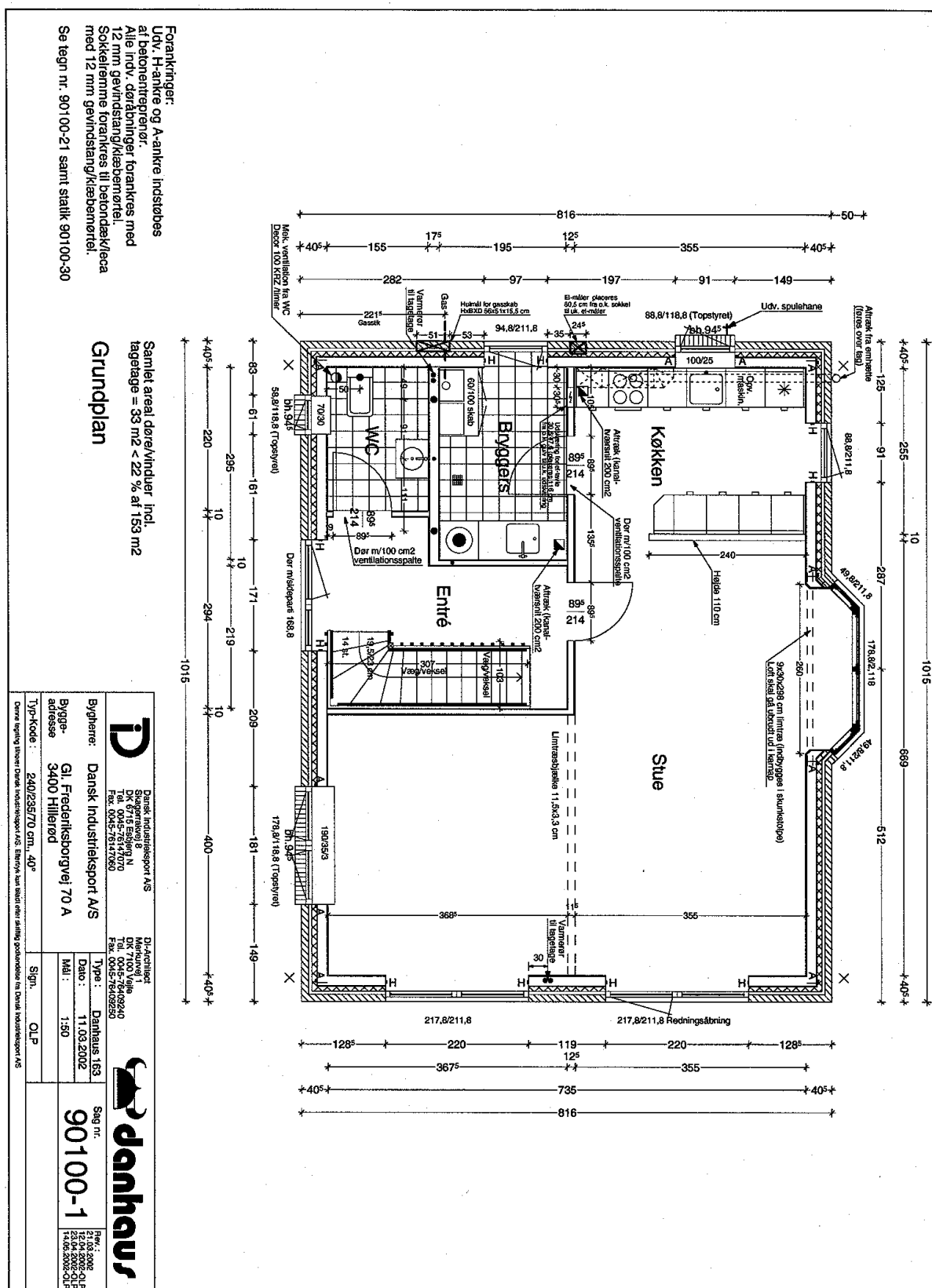
- [1] Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling. Energiministeriet, april 1990.
- [2] Oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 og skitser til bestemmelser i år 2012. Udkast. Søren Aggerholm, By og Byg, August 2001.
- [3] Bygningsreglementet 1995 (BR95). Boligministeriet, Bygge- og Boligstyrelsen. 1995. København, Danmark.
- [4] Design Reference Year, DRY – et nyt dansk referenceår. Meddelelse nr. 281. Jerry Møller Jensen & Hans Lund. Laboratoriet for varmeisolering, DTU, oktober 1995.
- [5] Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 4. Udvikling af energirigtige ruder og vinduer. Undervisningsnotat BYG.DTU U-004, BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2001.
- [6] Udvikling og optimering af et energieffektivt straightner ventilationsaggregat med indbygget chopper varmeveksler. Olsen, H., Drivsholm, C., Christiansen, J., Jensen, J. S., Nielsen, T. R. og Svendsen, S. Teknologisk Institut (TI), udkast 2003.
- [7] Udformning og styring af energirigtige gulvvarmeanlæg. Kragh, J., Weitzmann, P. og Svendsen, S. Sagsrapport SR-02-33. BYG.DTU 2003.
- [8] HEAT2 (version 5.0). PC-program til beregning af 2-dimensionale varmestrømme (differensmetode). Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.
- [9] HEAT3 (version 3.00). PC-program til beregning af 3-dimensionale varmestrømme (differensmetode). Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.
- [10] THERM 2.1a. Finite Element program til beregning af to-dimensionale varmestrømme. Lawrence Berkeley National Laboratory (USA), 2001.
- [11] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 1: Konstruktioner/systemer. Byggesystem: Fuldmuret. Tommerup, H. M. og Rose, J. Rapport BYG.DTU R-???. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.
- [12] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 1: Konstruktioner/systemer. Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer. Tommerup, H. M. og Rose, J. Rapport BYG.DTU R-056. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.
- [13] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 1: Konstruktioner/systemer. Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet. Tommerup, H. M. og Rose, J. Rapport BYG.DTU R-040. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.
- [14] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 1: Konstruktioner/systemer. Byggesystem: Lette ydervægselementer i træskelet. Rose, J. og Tommerup, H. M. Rapport BYG.DTU R-054. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.

- [15] Typehus svarende til BR-2005 – energikrav. Del 1: Optimering af konstruktioner/systemer. Rose, J. Rapport BYG.DTU R-001. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2001.
- [16] Dansk Standard 418 (DS418): Beregning af bygningers varmetab. 6. udgave. 2002.
- [17] TSBI3. 1998.
- [18] BSIM2000: Et integreret EDB-værktøj til termisk analyse af bygninger og installationer. Statens Byggeforskningsinstitut, 2000.
- [19] BSIM2002: Et integreret EDB-værktøj til termisk analyse af bygninger og installationer. Statens Byggeforskningsinstitut, 2002.
- [20] SBI-Anvisning 184. 1995. Bygningers energibehov. Varmeisolering, Konstruktionseksempler, Ventilation, Belysning. Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Danmark. 1995.
- [21] Perez, R., Ineichen, P. og Seals, R. (1990) Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, vol. 44, p. 271-289.
- [22] DS 474 – Norm for specifikation af termisk indeklima. 1. udgave, december 1993.
- [23] ISO/FDIS 12569:2000. Thermal performance of buildings – Determination of air change in buildings – Tracer gas dilution method.
- [24] EN 13829:2000. Thermal performance of buildings – Determination of air permability of buildings – Fan pressurization.
- [25] PrEN ISO 13790. Thermal performance of buildings – calculation of energy use for space heating.
- [26] DIN norm 4108. Wärmeschutz im Hochbau. 2001.
- [27] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 2: Måling af opvarmningsbehov. Byggesystem: Skalmurede porebetonelementer. Tommerup, H. M. og Rose, J. Rapport BYG.DTU R-060. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.
- [28] Forsøgshus med nye typer klimaskærmskonstruktioner. Del 2: Måling af opvarmningsbehov. Byggesystem: Lette ydervægselementer i stålskelet. Tommerup, H. M. og Rose, J. Rapport BYG.DTU R-065. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2003.
- [29] Typehus svarende til BR-2005 – energikrav. Del 2: Måling af opvarmningsbehov. Rose, J. Rapport BYG.DTU R-023. BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. 2002.
- [30] Numerical investigation of floor heating systems in low energy houses. Kragh, J., Weitzmann, P. and Jensen, C. F. 2002. Building Physics in the Nordic Countries, Proceedings of the 6th symposium, Oslo, Norway.

10 BILAG



Bilag 1. Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet. Beliggenhedsplan.



Bilag 2. Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet. Grundplan for stueetage.



Bilag 4. Hus C. Lette ydervægselementer i træskelet. Facader.

